

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Розробка макету для прямого експонування топології друкованих плат

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи АКТАКІТ-21-3

Манченко Антон Віталійович

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Фролов А.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

Невлюдов І. Ш.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2025 p.

Я, як студент ХНУРЕ Манченко Антон Віталійович, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержав недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата

ПІБ

Манченко А.В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програм _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

«16» січня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Балабанову Ігорю Володимировичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання параметрів експонування топології при автоматизованому виробництві друкованих плат _____

Затверджена наказом по університету від 03.01.2023 р. № 1288 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16.01.2024 _____

3. Вихідні дані до роботи: _____

3.1 Технології виготовлення друкованих плат _____

3.2 Методи експонування топології друкованих плат. _____

3.3 Огляд технологій фотополімерного 3D-друку; _____

3.4 Вибір елементної бази та розробка конструкції макету для експонування топології друкованих плат _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Вступ; _____

4.2 Аналіз предметної області; _____

4.3 Розробка конструкції макету; _____

4.4 Розробка 3D-моделі верстату для експонування ДП; _____

4.5 Охорона праці; _____

4.6 Висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (*.ppt) 12– с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

| Найменування розділу | Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові) | Позначка консультанта про виконання розділу | |
|----------------------|---|--|------|
| | | підпис | дата |
| | | | |
| | | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|--|--------------------------------|----------|
| 1 | Отримання завдання | | виконано |
| 2 | Збір матеріалів для проведення розробки | | виконано |
| 3 | Розробка розділу «Аналіз предметної області» | | виконано |
| 4 | Розробка розділу «Розробка макету» | | виконано |
| 5 | Розробка розділу «Розробка 3D-моделі макету» | | виконано |
| 6 | Розробка розділу Охорона праці | | виконано |
| 7 | Оформлення кваліфікаційної роботи | | |

Дата видачі завдання 01.09.2025

Студент _____
(підпис)

Манченко А.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Фролов А.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 62 с., 9 табл., 32 рис., 21 джерел.

ФОТОЛІТОГРАФІЯ, ДРУКОВАНА ПЛАТА, ФОТОПОЛІМЕРНИЙ ДРУК,
LCD 3D-ДРУК, РЕГРЕСІНА МОДЕЛЬ.

Об'єкт дослідження – процеси експонування топології друкованих плат.

Предмет дослідження – технологія фотолітографії для друкованих плат.

Мета роботи – розробка малогабаритного верстату для прямого експонування одношарових (ОДП) та двошарових друкованих плат (ДДП).

Проведено аналіз існуючих процесів фотополімерного друку, розглянуті види технологій 3D-друку, а саме SLA, DLP та LCD. Для проведення досліджень розглянуто макет для експонування топології друкованих плат за технологією LCD.

В результаті дослідження таких чинників, як температура, час експонування та інтенсивність випромінювання, побудована регресійно-кореляційна модель, яка показує вплив параметрів друку на збереження геометричних розмірів моделі.

Отримані результати можуть бути використані при організації та налаштуванні автоматизованого виробництва друкованих плат.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 62 p., 9 tabl., 32 fig., 21 sources.

PHOTOLITHOGRAPHY, PRINTED BOARD, PHOTOPOLYMER PRINTING, LCD 3D-PRINTING, REGRESSION MODEL.

The object of research is the processes of additive production of three-dimensional models.

The subject of research is photopolymer 3D printing technology.

The purpose of the work is to analyse the technologies of photopolymer printing, consider the exposure process in detail, model the influence of the temperature of the photopolymer resin during exposure of the topology of printed circuit boards in automated production.

The analysis of existing photopolymer printing processes was carried out, and the types of 3D printing technologies, namely SLA, DLP and LCD, were considered. To conduct research, a layout for displaying the topology of printed circuit boards using LCD technology was considered.

As a result of the study of such factors as temperature, exposure time and radiation intensity, a regression-correlation model was built, which shows the influence of printing parameters on the preservation of the geometric dimensions of the model.

The obtained results can be used in the organization and adjustment of the automated production of printed circuit boards.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Перелік умовних скорочень | 7 |
| Вступ | 8 |
| 1 Аналіз предметної області | 10 |
| 1.1 Фотолітографія | 10 |
| 1.2 Види друкованих плат | 12 |
| 1.3 Методи виготовлення друкованих плат | 16 |
| 1.4 Опис процесу експонування | 20 |
| 1.5 Обладнання для експонування друкованих плат | 23 |
| 1.6 Фотополімерний друк | 29 |
| 1.7 Аналіз технічного завдання ТЗ | 30 |
| 1.8 Висновки до першого розділу | 31 |
| 2 Розробка конструкції макету | 32 |
| 2.1 Кінематична схема макету | 32 |
| 2.2 Елементна база макету | 33 |
| 2.2.1 Механічна складова..... | 33 |
| 2.2.2 Механічна складова..... | 34 |
| 2.3 Висновки до другого розділу | 38 |
| 3 Розробка 3D-моделі верстату для експонування ДП | 40 |
| 3.1 Компоновка макету | 40 |
| 3.1.1 Розробка рами верстату | 41 |
| 3.1.2 Відсік для елементів експонування топології | 42 |
| 3.1.3 Відсік для елементів керування верстатом..... | 45 |
| 3.1.4 Зовнішні панелі макету та захисний ковпак екрану | 48 |
| 3.2 Висновки до третього розділу | 49 |
| 4 Охорона праці | 51 |
| 4.1 Безпека при роботі з хімічними матеріалами | 51 |
| 4.2 Висновки до четвертого розділу | 53 |
| Висновки | 54 |

| | |
|------------------------------------|----|
| Перелік джерел посилання | 56 |
| Додаток А Демонстраційний матеріал | 59 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДДП – Двошарова друкована плата

ДП – Друкована плата

ОДП – Одношарова друкована плата

СПФ – Сухі плівкові фоторезисти

ФР – Фоторезист

ФШ – Фотошаблон

DLP – Digital Led Projection

LCD – Liquid Crystal Display

SLA – Stereo Lithography

ВСТУП

У сучасному світі електроніки зростає потреба у швидкому, точному та доступному виготовленні друкованих плат, які є основою більшості електронних пристроїв. Традиційні методи виготовлення друкованих плат, такі як фоторезистивна експонування з використанням ультрафіолетових ламп і фотошаблонів, є досить витратними, трудомісткими та мають обмеження щодо гнучкості виробничого процесу. У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні нових, більш ефективних рішень, зокрема — використання технологій, заснованих на цифровому виробництві. Одним із перспективних напрямків є розробка верстату для прямого експонування друкованих плат з використанням технології LCD 3D друку.

Такий підхід дозволяє значно знизити вартість виробництва, підвищити роздільну здатність експонування та автоматизувати процес виготовлення плат без необхідності в дорогих фотошаблоних. Крім того, можливість прямого експонування відкриває нові горизонти для індивідуального та прототипного виробництва, що особливо важливо для малих підприємств, стартапів та інженерів-ентузіастів.

Мета роботи – розробка малогабаритного верстату для прямого експонування одношарових (ОДП) та двошарових друкованих плат (ДДП).

Об'єкт розробки – процеси експонування топології друкованих плат.

Предмет розробки – технологія фотолітографії для друкованих плат.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технології фотолітографії друкованих плат;
- проаналізувати види друкованих плат та методи їх виготовлення;
- розглянути технологію експонування зображень на базі фотополімерного 3D-друку;
- розробити технічне завдання для майбутньої установки для прямого експонування друкованих плат;

– розробити конструкцію верстату для прямого експонування друкованих плат.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Фотолітографія

Фотолітографія являє собою високотехнологічний метод формування мікроструктур з високою роздільною здатністю на поверхні матеріалів шляхом опромінення світлочутливого фоторезисту ультрафіолетовим випромінюванням з подальшими етапами хімічної обробки. Ключовими компонентами цього процесу, які визначають його ефективність і точність, є фоторезист, фотошаблон, а також конкретна технологічна схема реалізації, що залежить від технічних характеристик використовуваного обладнання. Застосовується фотолітографія переважно у виробництві напівпровідникових приладів, мікросхем та інтегральних схем, де потрібна надзвичайно висока точність і мінімальні розміри структур.

Фоторезист (ФР) — це світлочутливий матеріал, який змінює свої хімічні властивості під впливом опромінення, що дозволяє формувати задані мікроструктури на поверхні підкладки. Залежно від форми випуску та складу, фоторезисти поділяються на рідкі — на основі водних або органічних розчинників, та сухі плівкові фоторезисти (СПФ), що застосовуються у вигляді твердих плівок. Рідкі фоторезисти можуть бути з двома основними типами: позитивні, де опромінені області розчиняються в розчиннику, та негативні, де опромінені області затверджують, а непоглинуті ділянки розчиняються. Сухі плівкові фоторезисти використовуються для формування тонких плівок на поверхні, де контроль товщини і однорідності матеріалу є критичним для точності виготовлених структур.

Ці фоторезисти мають важливі характеристики, такі як чутливість до світла, адгезія до поверхні підкладки, механічна міцність та хімічна стійкість, які впливають на якість і ефективність фотолітографічного процесу. Вибір типу

фоторезисту визначається специфікою застосування, вимогами до точності і складності структури, що виготовляється.

Метод полягає в контактному копіюванні зображення схеми з фотошаблону на заготовку друкованої плати (ДП), покриту світлочутливим фоторезистом. Основні етапи фотохімічного процесу:

- очищення та підготовка поверхні заготовки;
- нанесення УФ-чутливого фоторезисту;
- після висихання фоторезисту ФШ точно суміщується із заготовкою за допомогою реперних знаків і базових отворів;
- експонування малюнка схеми через ФШ ультрафіолетовим світлом, у результаті чого створюється приховане зображення;
- проявлення та закріплення малюнка у вигляді захисної фотомаски.

Негативні фоторезисти під дією світла стають нерозчинними, тому при проявленні зберігаються освітлені ділянки. У позитивних фоторезистах, навпаки, експоновані області стають розчинними і видаляються у лужному проявнику.

На рис. 1.1 наведена спрощена схема процесу фотолітографії [8]:

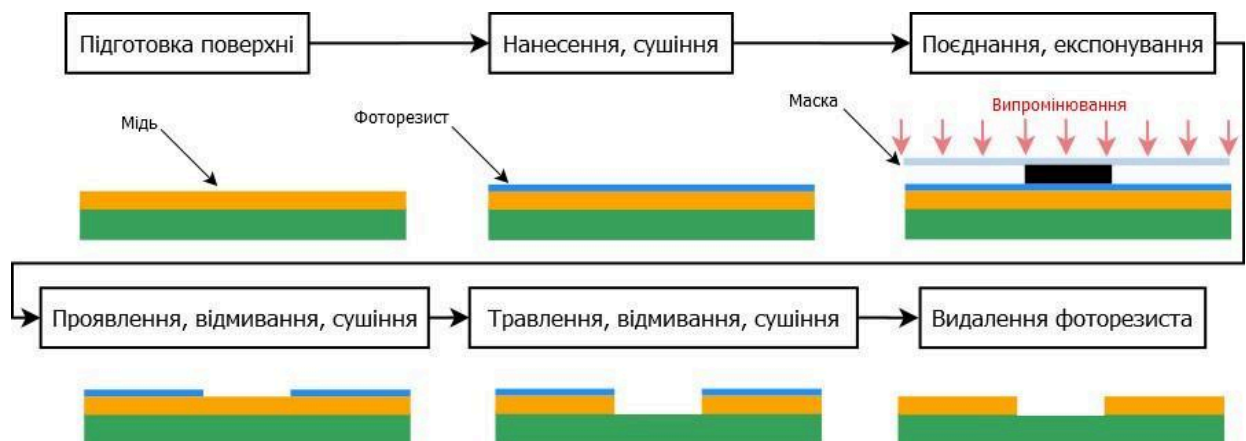


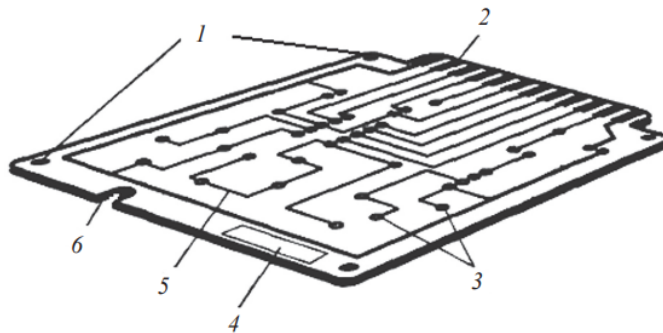
Рисунок 1.1 – Спрощена схема фотолітографії для друкованих плат

Роздільна здатність фотолітографічного процесу та точність відтворення геометричних параметрів елементів друкованого рисунка визначаються оптичними властивостями фоторезисту та його товщиною; зі збільшенням

товщини шару фоторезисту спостерігається зниження просторової роздільної здатності через дифракційні ефекти та зростання розсіювання світла.

1.2 Види друкованих плат

Друкована плата (ДП) – це конструктивно-технологічний елемент, що являє собою плоску ізоляційну основу з передбаченими отворами, пазами та вирізами, на поверхні якої сформована топологія струмопровідних доріжок. Провідники забезпечують монтаж, електричне з'єднання та комутацію компонентів електронного пристрою відповідно до електричної принципової схеми, рис. 1.2.



1 – отвори кріплення; 2 – кінцеві друковані контакти; 3 – монтажний отвір;
4 – місце маркування; 5 – друкований провідник; 6 – паз орієнтації

Рисунок 1.2 – Друкована плата

Рисунок друкованої плати – це визначена конфігурація провідникових та діелектричних елементів, сформована на поверхні друкованої плати.

Провідниковий рисунок представляє собою схему розміщення провідного матеріалу, який забезпечує електричні з'єднання між елементами схеми. Він має відповідати вимогам якості: бути чітким, із рівними краями, без здуттів, підтравлень, розривів, відшарувань, механічних пошкоджень або залишків технологічних матеріалів.

Друкований провідник (доріжка) – окрема струмопровідна смужка в межах провідникового рисунка.

За кількістю провідних шарів друковані плати класифікують на одношарові, двошарові та багатошарові [9].

Одношарова друкована плата – це конструкція, у якій провідниковий шар розміщено лише з одного боку основи, рис. 1.3. Такі плати є технологічно простими та економічними у виробництві. Вони широко застосовуються в побутовій електроніці, блоках живлення та телекомунікаційних пристроях.

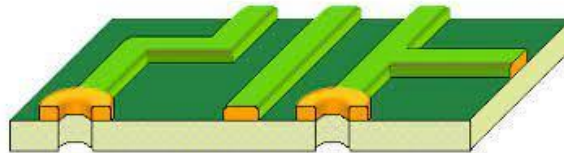


Рисунок 1.3 – Одношарова друкована плата

Двошарова друкована плата – це плата, на обох її поверхнях розміщені елементи провідникового малюнка та всі необхідні електричні з'єднання відповідно до принципової електричної схеми, рис. 1.4. Двошарові плати зазвичай використовуються в пристроях середньої складності, де економія простору та вартості є важливими факторами. Такі плати застосовуються у різноманітних електронних пристроях, зокрема: побутова радіоапаратура; блоки живлення; пристрої зв'язку; мікроконтролери та пристрої автоматизації.

Такий тип плати дозволяє зменшити розміри при збереженні необхідної функціональності. Виготовлення двошарових плат є менш складним і економічним, що робить їх популярними для масового виробництва.

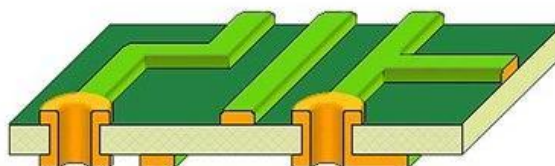


Рисунок 1.4 – Двошарова друкована плата

Багатошарова друкована плата – це конструкція, що складається з кількох шарів ізоляційного матеріалу, між якими чергуються провідникові рисунки. Така плата включає два або більше провідних шарів, з'єднаних між собою необхідними сполуками, рис. 1.5. Багатошарові плати використовуються в складних та високотехнологічних електронних системах, де необхідна висока щільність з'єднань, висока швидкість передачі сигналів та мінімізація простору. Зазвичай їх застосовують у таких галузях: високочастотні пристрої; мікропроцесорні системи та комп'ютерні материнські плати; автомобільна електроніка; авіаційна та космічна техніка; телефонні та телекомунікаційні мережі; медичне обладнання.

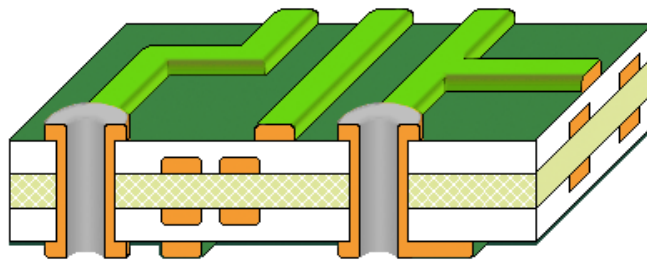


Рисунок 1.5 – Багатошарова друкована плата

Виготовлення багатошарових плат є більш складним і дорогим, оскільки вимагає точного монтажу та забезпечення надійних сполучень між шарами. Однак вони дозволяють значно зменшити розміри та масу пристроїв при збереженні високої функціональності.

Гнучка друкована плата (ГДП), гнучкий друкований кабель, гнучко-жорсткі плати – це новітні конструкції та системи міжз'єднань, що використовуються замість традиційних жорстких друкованих плат, плоских стрічкових проводів, джгутів та об'ємних провідників. Вони забезпечують високу гнучкість у проектуванні та виготовленні складних електронних систем.

Гнучка друкована плата (ГДП) має гнучку основу або базовий матеріал, що дозволяє їй змінювати форму і вигинатися без пошкодження провідників,

рис. 1.6. Це дозволяє використовувати ГДП в обмежених просторах або у виробках, де жорсткість плати є недоцільною. Вона є аналогом жорсткої друкованої плати, але з можливістю деформації та адаптації до необхідної форми, що робить її ідеальним рішенням для таких сфер, як мобільні пристрої, гнучкі екрани, імпланти та інші технології, де потрібна висока компактність і мобільність.

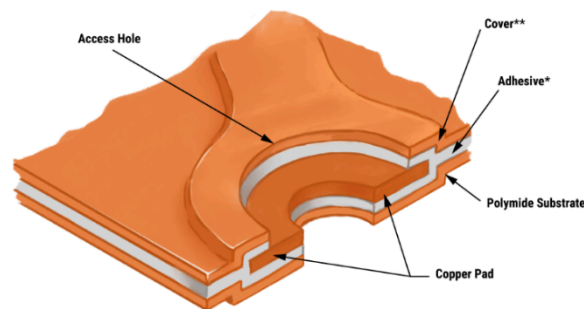


Рисунок 1.6 – Гнучка друкована плата

Багатошарові гнучкі друковані плати не є прямими аналогами жорстких багатошарових плат, оскільки кожен шар може бути подовжений у будь-якому напрямку і використовуватись для з'єднання з іншими модулями електронних систем. Така конструкція дозволяє створювати більш складні та гнучкі електронні системи, що можуть адаптуватися до вимог конструкцій, де необхідно поєднувати гнучкість з високою щільністю з'єднань і функціональністю.

Гнучкі плати використовуються в багатьох галузях, зокрема в авіації, медицині, мобільній електроніці та військових технологіях, де висока гнучкість, компактність та надійність є ключовими вимогами. Основними показниками якості друкованих плат є ширина провідників та діаметр міжшарових переходів. Тенденція розвитку технологій виготовлення друкованих плат полягає в зменшенні ширини провідникових доріжок та збільшенні кількості міжшарових переходів. Це досягається завдяки зменшенню розмірів переходів і впровадженню використання поверхневих контактних майданчиків для підключення виходів компонентів. Такий підхід дозволяє збільшити щільність

з'єднань та підвищити ефективність використання простору на платі, що є важливим для створення високотехнологічних електронних пристроїв.

1.3 Методи виготовлення друкованих плат

Для створення провідного рисунку на шарах друкованих плат використовують два основні типи технологій: субтрактивну та адитивну. Кожна з цих технологій має свої переваги та специфіку використання в залежності від типу плат, вимог до щільності з'єднань та складності конструкції.

Субтрактивний метод включає видалення надлишку металу з поверхні фольгованої основи за допомогою травлення. На поверхню плати наноситься захисний шар (фоторезист), і тільки відкриті ділянки піддаються хімічному травленню. У результаті цього процесу отримують чітке зображення провідників. Основні етапи субтрактивної технології:

- нанесення фоторезисту. Спочатку на фольговану основу (діелектричний матеріал, покритий мідною фольгою) наноситься фоторезист. Це може бути сухий плівковий фоторезист (СПФ) або рідкий фоторезист;

- процес фотолітографії. Під впливом ультрафіолетового світла через спеціальну маску (шаблон) на фоторезисті формуються ділянки з різним ступенем затвердження. У залежності від типу фоторезисту (негативний чи позитивний), на експонованих або неекспонованих ділянках фоторезисту формуються захисні або відкриті зони для травлення;

- травлення. Після процесу фотолітографії, незафарбовані ділянки фоторезисту видаляються (в залежності від типу фоторезисту), і через відкриті ділянки мідна фольга піддається травленню, зазвичай в хімічних розчинах, таких як розчин хлорного заліза або амоній хлорид;

- завершення процесу. Після травлення залишки фоторезисту змиваються, і на платі залишається тільки необхідний провідниковий рисунок.

Негативний процес із використанням сухого плівкового фоторезиста (СПФ), рис. 1.7, є одним із найпоширеніших методів для виготовлення

одношарових і двошарових друкованих плат. Цей процес застосовується для виготовлення простих плат, де не потрібно металізувати внутрішні стінки отворів. Металізація внутрішніх стінок отворів в даному методі не виконується, що обмежує його використання для лише двошарових плат з зовнішніми з'єднаннями. Процес фотолітографії за допомогою СПФ є досить простим, з меншими вимогами до точності та використовує традиційну техніку травлення.

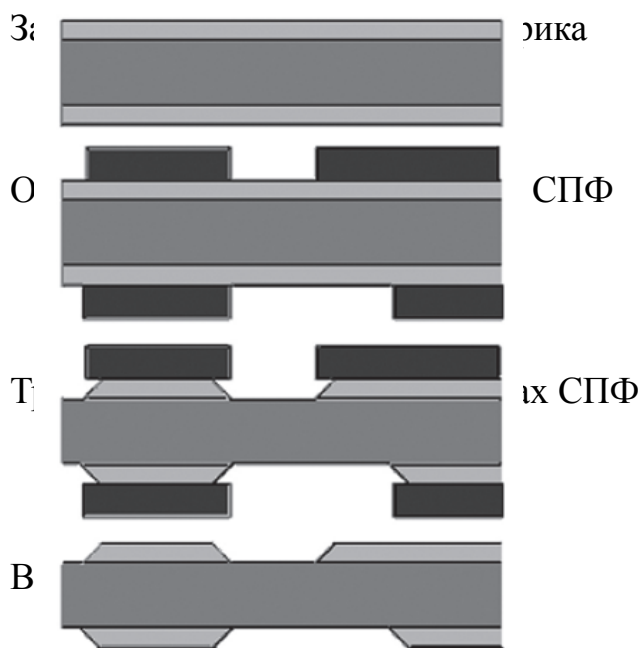


Рисунок 1.7 – Негативний процес з використанням сухого плівкового фоторезисту

Адитивна технологія відрізняється від субтрактивної тим, що провідникові шари не травляться, а осаджуються на поверхню плати. Провідники формуються за допомогою гальванічного осадження металу, а ізоляційні шари утворюються пресуванням діелектричних матеріалів тільки в тих місцях, де це необхідно. Основні етапи адитивної технології:

- осадження провідників. Вибіркове осадження металу (зазвичай міді) здійснюється на необхідних ділянках за допомогою гальванічного осадження. Це дозволяє точно формувати провідникові шари з високою роздільною здатністю. Гальванічний процес дає можливість контролювати товщину провідникових доріжок;

– формування ізоляції. В процесі адитивної технології між провідниками також вибірково формується ізоляція – діелектричний матеріал, що використовується для розділення провідників і забезпечення необхідної електричної ізоляції між ними;

– виготовлення складних плат. Адитивні методи дозволяють створювати складні багат шарові плати, оскільки не потрібно вирізати метал із основи. Метал осаджується тільки в необхідних місцях, що дозволяє отримати високоточні та щільно розташовані провідникові шари, особливо важливі для мініатюризованих електронних пристроїв.

До переваг адитивної технології, можна віднести:

– менше витрат матеріалів. На відміну від субтрактивної технології, де великий обсяг матеріалу йде на відходи (використовується більша кількість металу, який потім травиться), адитивний метод дозволяє значно знизити витрати металу;

– висока точність. Адитивні методи дозволяють створювати складні геометрії провідників з високою точністю, що особливо важливо для виготовлення плат з високою щільністю компонентів;

– менша товщина провідників. Оскільки провідники формуються тільки в необхідних місцях, товщина доріжок може бути дуже малою, що дозволяє розміщувати компоненти з високою щільністю на платі.

Вибір між субтрактивною та адитивною технологією залежить від кількох факторів:

– тип плати. Для простих одношарових та двошарових плат зазвичай використовують субтрактивну технологію. Для багат шарових плат або дуже складних схем, де потрібно мінімізувати використання матеріалів та збільшити щільність компонентів, більш ефективною буде адитивна технологія;

– вимоги до точності. Якщо потрібна висока точність, використання адитивної технології є оптимальним, оскільки вона забезпечує кращу точність осадження металу;

– вартість та економічність. Субтрактивні методи дешевші для масового виробництва, тому вони часто застосовуються в серійних виробках, де не потрібні висока точність і мала товщина доріжок.

У процесі виготовлення друкованих плат за субтрактивною технологією значну роль відіграє метод з використанням сухого плівкового фоторезиста (СПФ). Цей метод дозволяє не лише формувати точний провідниковий рисунок, але й забезпечувати металізацію отворів, що є критично важливим для двошарових та багатошарових друкованих плат. Послідовність технологічного процесу:

– підготовка заготовки. На початковому етапі береться фольгований діелектрик, на якому вже виконані отвори свердління. Після цього здійснюється попередня металізація – на стінки отворів та поверхню фольги наноситься тонкий шар міді товщиною від 5 мкм до 7 мкм. Металізація проводиться методом хімічного або гальванічного осадження;

– нашарування СПФ та фотолітографія. На всю поверхню заготовки наноситься сухий плівковий фоторезист. Далі виконується експонування через фотошаблон, внаслідок чого на поверхні утворюється захисний рельєф у місцях, де мідь не повинна бути видалена. Після проявлення фоторезисту формується захисна маска, що визначає контури майбутнього провідного рисунку;

– осадження металів. На незахищені ділянки поверхні (включаючи стінки отворів) послідовно осаджуються;

– видалення фоторезисту та травлення. Після завершення гальванічного осадження СПФ видаляється, а незахищені шари тонкої міді витравлюються у хімічному травильному розчині. Завдяки попередньому осадженню мідь під металорезистом залишається недоторканою, зберігаючи провідникову структуру. Цей процес дозволяє отримати металізовані отвори — важливу умову для багатошарових плат;

Тентінг-процес (tenting process). Ще одним різновидом субтрактивного підходу є тентінг-процес, що поєднує елементи як негативного, так і

позитивного методів. Заготівля також проходить свердління отворів і повну попередню металізацію, включаючи внутрішні стінки. Далі наноситься сухий плівковий фоторезист, який у процесі фотолітографії формує не лише рисунок провідників, але й утворює завіси (тенти) над отворами. Ці завіси захищають отвори від травлення, дозволяючи виконувати точне видалення мідної фольги тільки на відкритих ділянках, зберігаючи цілісність металізації в отворах. Цей метод забезпечує високу надійність з'єднань і захист металізованих отворів під час хімічного травлення, що особливо важливо для багатошарових конструкцій.

Використання тонкої мідної фольги товщиною від 5 мкм до 9 мкм у поєднанні з СПФ дозволяє виготовляти провідникові рисунки з високою роздільною здатністю. При товщині провідника від 5 мкм до 9 мкм можливе формування ширини провідників і проміжків між ними до 50 мкм. При товщині провідника від 40 мкм до 5 мкм мінімальна ширина доріжок і відстань між ними складає від 100 мкм до 125 мкм. Ці показники відповідають сучасним вимогам до високощільного монтажу та високочастотних схем, зокрема у мобільній, комп'ютерній та телекомунікаційній техніці.

Процес фотолітографії є трудомістким, вимагає високоточного обладнання та витратних матеріалів (фотошаблонів, хімікатів, фоторезистів). Крім того, для кожної нової схеми потрібно створювати індивідуальні фотошаблони, що збільшує час підготовки до виробництва. Відсутність гнучкості обмежує можливість швидкого переходу на новий тип виробу або оновлення схеми, що є суттєвим недоліком в умовах сучасного гнучкого, автоматизованого виробництва.

1.4 Опис процесу експонування

Експонування – це технологічна операція опромінення світлочутливого шару (фоторезисту) випромінюванням із високою інтенсивністю в ультрафіолетовому (УФ) діапазоні. Основною метою цього етапу є формування прихованого зображення майбутнього провідного рисунку на поверхні

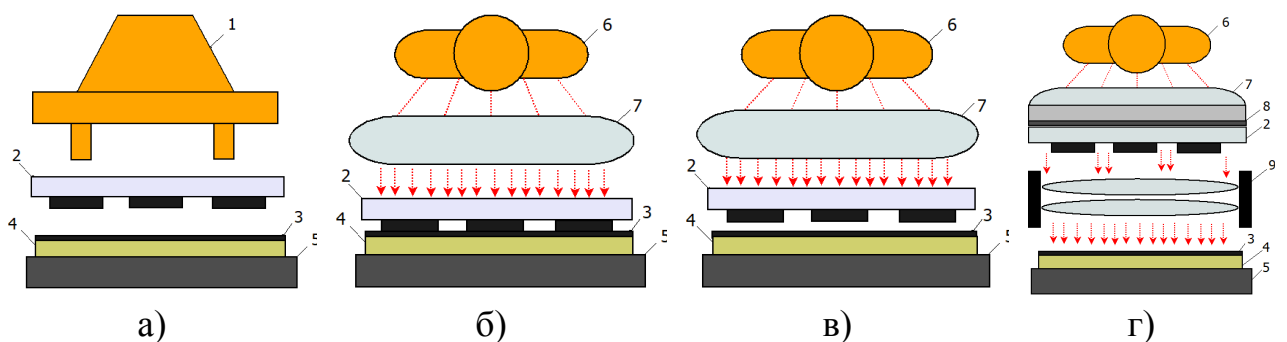
друкованої плати. Експонування є одним із найважливіших етапів у процесі фотолітографії, оскільки саме на цьому етапі формується топологія провідного рисунку майбутньої друкованої плати. Якість експонування безпосередньо впливає на точність геометрії провідників, надійність схеми та ефективність подальших технологічних операцій.

Процес експонування полягає в опроміненні світлочутливого фоторезисту ультрафіолетовим випромінюванням через відповідну маску або за допомогою скануючого променя. Існує два основних підходи:

- маскова фотолітографія;
- безмасочна (пряма) літографія.

Маскова фотолітографія. У традиційній схемі експонування використовується фотошаблон (ФШ) – плівка або скляна пластина з нанесеним негативним або позитивним зображенням провідного малюнка, рис. 1.8. Процес передбачає:

- проєкційне перенесення зображення з фотошаблону на фоторезист за допомогою оптичної системи лінз;
- використання джерел ультрафіолетового світла, зокрема ртутних ламп високого тиску або УФ-світлодіодів.



а – суміщення; б – контактне експонування; в – експонування із мікрозазором;
г – проєкційний метод експонування. 1 – двопільний мікроскоп; 2 – ФШ; 3 –
ФР; 4 – підкладка; 5 – столик; 6 – джерело експонування; 7 – конденсор; 8 –
фільтр; 9 – об'єктив

Рисунок 1.8 – Способи експонування

Іншим методом експонування, є лазерне експонування топологічних зображень ДП [4], рисунок 1.9:

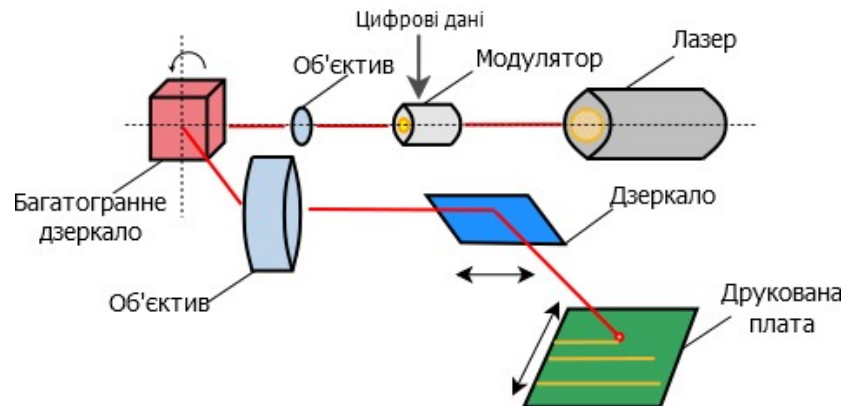


Рисунок 1.9 – Лазерне експонування топологічних зображень

Лазерне експонування – це сучасна безмасочна технологія перенесення зображення на фоторезист, яка ґрунтується на принципі точкового опромінення поверхні сфокусованим лазерним променем. На відміну від традиційної фотолітографії, де засвічення здійснюється через фотошаблон під УФ-лампами, у лазерному методі фокусування енергії відбувається безпосередньо в зоні експонування, що дозволяє досягати високої точності та виключати паразитні впливи.

При лазерному експонуванні полімеризація фоторезисту відбувається під дією вузьконаправленого лазерного випромінювання, яке переміщується відповідно до цифрового креслення провідного рисунку. Тільки ті ділянки фоторезисту, які опромінюються лазером, зазнають зміни своїх фізико-хімічних властивостей. Завдяки лазерному експонуванню, можливо:

- мінімізується паразитна засвітка провідників, що часто зустрічається при застосуванні фотошаблонів;
- підвищується точність відтворення рисунку, зменшується ймовірність дефектів;
- зменшується ширина провідників та відстань між ними, що дозволяє реалізовувати високощільний монтаж.

Процес фотолітографії включає низку послідовних операцій: нанесення фоторезисту на поверхню виробу, експонування за допомогою фотошаблону та подальше травлення. Для виконання кожного з цих етапів необхідне спеціалізоване обладнання та витратні матеріали. Через високу вартість, складність обслуговування та значні габарити, деякі пристрої (наприклад, установки для прямого експонування) непридатні для використання на невеликих підприємствах. У випадку масового виробництва кожен етап вимагає значних витрат часу, зокрема, при нанесенні фоторезисту методом аерозольного розпилення потрібен додатковий час на сушіння. Крім того, через можливі помилки оператора або збої в роботі обладнання, на будь-якому етапі можуть виникнути дефекти. Зниження впливу таких негативних факторів потребує підвищення рівня автоматизації, що дозволяє забезпечити контроль та узгоджену роботу всіх основних і допоміжних систем. Також на етапі травлення можуть виникати геометричні спотворення зображення порівняно з початковою топологією друкованої плати, наприклад, підтравлювання провідникових доріжок [8].

1.5 Обладнання для експонування друкованих плат

У процесі виготовлення друкованих плат на технологічних етапах нанесення фоторезистивного шару на підкладку та формування провідникового малюнка методом експонування застосовуються такі основні витратні матеріали:

- сухий плівковий або рідкий фоторезист (Solder Mask або Photoresist);
- фотоплівка для виготовлення трафаретів (фотошаблонів);
- трафаретна фарба для маскування;
- хімічні розчини для проявлення та видалення фоторезисту;
- знежирювальні та очисні засоби для підготовки поверхні підкладки до нанесення фоторезисту.

Застосування зазначених матеріалів потребує використання високоточного вузькоспеціалізованого технологічного обладнання, а саме:

- ламінатори для нанесення сухого плівкового фоторезисту або центрифуги для покриття рідким фоторезистом методом спін-коатингу;
- лазерні або струменеві принтери для виготовлення фотошаблонів топології;
- прецизійні оптичні мікроскопи чи автоматизовані системи суміщення трафаретів з підкладкою;
- установки прямого опромінення УФ-випромінюванням, лазерного або рентгенівського експонування провідникових структур;
- технологічні ванни або установки струменевого типу для змивання фоторезисту після експонування та проявлення.

Собівартість виготовлення друкованої плати (ДП) формується з вартості витратних матеріалів з урахуванням амортизаційних відрахувань на технологічне обладнання, витрат на виготовлення, енергоспоживання та трудових ресурсів. Зважаючи на це, для визначення повної собівартості доцільно окремо проаналізувати витрати на витратні матеріали, а також вартість відповідного устаткування, необхідного для їхнього застосування — з метою розрахунку амортизаційного навантаження. Ціни на сухий плівковий та рідкий фоторезист, які використовуються при виготовленні односторонніх (ОДП) та двосторонніх друкованих плат (ДДП), наведені в табл. 1.1.

Зазначимо, що рідкий фоторезист, як правило, застосовується у виробництві ДП з підвищеним класом точності, що зумовлює його вищу вартість порівняно з плівковим аналогом.

Таблиця 1.1 – Вартість плівкових та рідких фоторезист

| № | Назва | Вартість, грн/м ² |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Плівковий фоторезист | | |
| 1 | Фоторезист плівковий сухий 2107-02975 | 242,00 |
| 2 | Фоторезист плівковий сухий FF-9040S | 143,38 |
| 3 | Фоторезист OEM | 304,00 |
| 4 | СПФ-1 | 208,00 |

| | | |
|---|------------------------|--------|
| 5 | СПФ-2 | 224,00 |
| 6 | СПФ-ВЦ (ТУ6-17-359-77) | 411,74 |
| 7 | Ordyl Alpha 350 | 57,60 |
| 8 | Riston-200 | 160,00 |

Продовження таблиці 1.1.

| 9 | Orajjet 3165G | 434,00 |
|-------------------|----------------|-----------------|
| 10 | CX-1000 | 49,52 |
| 11 | Rexant 09-3480 | 439,00 |
| 12 | Photec PH-2000 | 605,00 |
| Рідкий фоторезист | | |
| № | Назва | Вартість, грн/л |
| 1 | XR-7000 | 2244,00 |
| 2 | ФРЖ | 2902,80 |
| 3 | XR-3602 | 532,80 |
| 4 | Positiv 20 | 2436,00 |
| 5 | Transparent 21 | 1015,00 |

Вартість технологічного обладнання для нанесення фоторезисту залежить не лише від типу фоторезисту (сухий плівковий чи рідкий), але й від площі робочої зони установки, що визначає максимально допустимі розміри оброблюваних заготовок. Цей фактор безпосередньо впливає на загальні капітальні витрати та, відповідно, на амортизаційні відрахування у структурі собівартості. На рис. 1.10 наведено приклади обладнання з різними розмірами робочої зони та відповідною ціновою категорією.



а)



б)

Рисунок 1.10 – Установки для нанесення фоторезистора

Чим більша площа нанесення, тим вище вартість установки, і при цьому задіяна велика робоча площа приміщення, табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вартість установок для ламінування та центрифужного нанесення фоторезиста

| Верстат для ламінування | | | |
|---|---------------------------------|----------------------|---------------|
| № | Назва | Розміри верстата, мм | Вартість, грн |
| 1 | YDFM 920 - AT210042 | 1900×1500×1600 | 174963,00 |
| 2 | YDFM 720 - AT000641 | 1900×1300×1600 | 196082,00 |
| 3 | FMY-720B - AT000635 | 1450×1125×1300 | 158558,00 |
| 4 | Guang Ming YDFM 720A - AT000647 | 700×1200×1300 | 119230,00 |
| Верстат для центрифужного нанесення фоторезиста | | | |
| № | Назва | Розміри верстата, мм | Вартість, грн |
| 1 | Osiris VARIXX 804 | 1300×1300×2100 | 182843,00 |
| 2 | HO-TH-05 | 200×150×380 | 182843,00 |
| 3 | Avanti JXN-30 | 650×875×1200 | 112506,92 |
| 4 | УАРЭС-2 | 290×200×380 | 138570,00 |

Для виготовлення односторонніх (ОДП) та двосторонніх друкованих плат (ДДП) з відносно простою топологією переважно застосовується метод експонування через фототрафарет. Порівняно з прямим експонуванням (лазерним або іншим високоточним методом), цей підхід є економічно доцільнішим завдяки нижчим капітальним і експлуатаційним витратам.

Однак технологія фототрафаретного експонування має й певні недоліки, зокрема – необхідність у виготовленні самих трафаретів, що потребує застосування спеціалізованих принтерів, які формують зображення топології на фотоплівці. На рис. 1.11 представлено приклад обладнання, яке використовується для друку фототрафаретів.



Рисунок 1.11 – Принтер для виготовлення трафаретів топології ДП

Ціни принтерів та виготовлення трафаретів представлені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики принтерів виготовлення трафаретів ДП

| № | Назва | Поле для друку | Вартість, грн |
|---|--------|----------------|---------------|
| 1 | Go LED | 1200×350мм | 16450,00 |
| 2 | Go29 | 600×450мм | 31968,00 |

Альтернативою використанню фототрафаретів є застосування установок прямого експонування топології безпосередньо на поверхню підкладки. Таке обладнання вважається більш технологічним, оскільки забезпечує вищу точність, повторюваність та дозволяє обійтись без етапу виготовлення фотошаблону. На рис. 1.12 наведено приклади установок прямого експонування, які можуть бути інтегровані у виробничий процес.

Серед відносно доступних варіантів високотехнологічного експонування слід відзначити установки лазерного та рентгенівського типу. Попри те, що їхня вартість значно перевищує вартість традиційного обладнання для роботи з трафаретами, ці рішення дозволяють скоротити кількість технологічних операцій і підвищити загальну ефективність виробництва. Орієнтовні ціни на відповідні типи установок наведено в таблиці 1.4.



Рисунок 1.12 – Лазерна установка для прямого експонування ДП

Таблиця 1.4 – Характеристики установок для експонування ДП

| № | Назва | Розміри верстата, мм | Вартість, грн |
|---|-------------------|----------------------|---------------|
| 1 | UVE-M500 | 1340×2100×1800 | 18284,30 |
| 2 | C SUN UVE-M720 | 2807×1672×1693 | 17466,00 |
| 3 | COLIGHT DMVL 1630 | | |
| 4 | Ledia SB | 540×661 | |
| 5 | Ledia SD | 610×661 | |
| 6 | UV-P50 | 460×615 | |
| 7 | MIVA2050L-DI | 1450×1220×1750 | |
| 8 | MIVA2025L-DI | 1050×2280×1950 | |
| 9 | Cirgraphics T4000 | | |

Найдоступнішим за вартістю джерелом випромінювання для експонування фоторезисту є ультрафіолетові (УФ) лампи. Вони широко застосовуються у виробництві друкованих плат з невисокими вимогами до роздільної здатності та точності топологічного малюнка. Такі джерела світла мають обмеження щодо спектру випромінювання, стабільності інтенсивності та точності формування зображення, що знижує їхню ефективність у високоточному виробництві.

На рис. 1.13 представлено приклад установки з використанням УФ-ламп для експонування друкованих плат початкового рівня складності.



Рисунок 1.13 – Лампа для експонування ДП

Таким чином, процес фотолітографії включає низку послідовних технологічних операцій: нанесення фоторезисту на поверхню підкладки,

експонування топологічного зображення за допомогою фотошаблону або методом прямого експонування, а також подальше хімічне травлення.

Кожен з цих етапів потребує застосування спеціалізованого обладнання та відповідних витратних матеріалів, вартість і складність яких значно варіюються залежно від обраної технології.

1.6 Фотополімерний друк

Технології фотополімерного 3D-друку, по свої суті беруть початок з класичного методу фотолітографії, а саме з перенесення зображення на поверхню заготовки (експонування зображення). Відмінності по факту тільки дві:

- фотолітографія використовуються для виготовлення 2D-структур, а фотополімерний друк для тривимірних об'єктів;
- у фотолітографії використовуються плівковий або рідкий фоторезист, у фотополімерному друку рідка фотополімерна смола.

Але не зважаючи на ці відмінності полімеризація фото-чутливого матеріалу відбуваються за допомогою світла.

В загалом існують три технологій фотополімерного 3D-прототипування, рис. 1.14. Всі вони засновані на методі по шарового експонування перетину моделі.

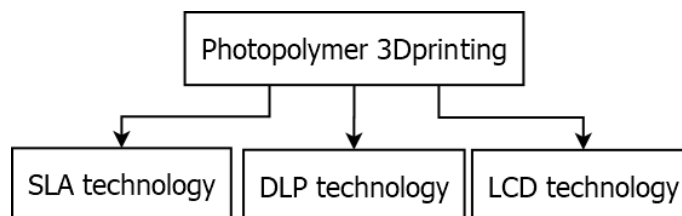


Рисунок 1.14 – Види фотополімерного 3D-друку

Розглянемо одну з найдоступніших технологій фотполімерного друку Liquid Crystal Display (LCD). LCD-друк базується на принципі полімеризації

фоточутливої смоли під дією ультрафіолетового (UV) світла, яке проходить через рідкокристалічний дисплей (LCD). Цей дисплей виступає маскою, блокуючи або пропускаючи світло для формування потрібного шару об'єкта, рис. 1.15.

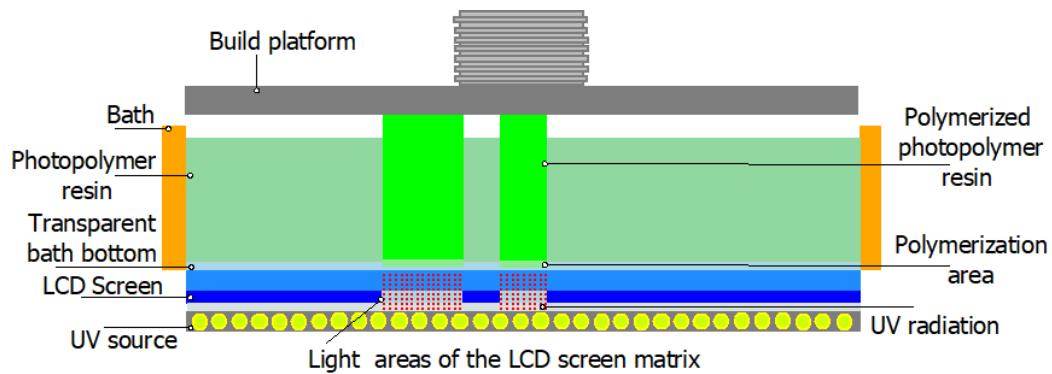


Рисунок 1.11 – Схема роботи LCD принтера

Виходячи з принципу побудови моделі за даною технологією дуже схожий на методи прямого експонування зображення. Подібний підхід з використанням УФ-лампи та LCD-екрану, можна буде використовувати для експонування одношарових та двошарових друкованих плат.

1.7 Аналіз технічного завдання ТЗ

Згідно з завданням буде розроблений малогабаритний верстат для прямого експонування ОДП та ДДП на базі технології LCD 3D-друку, який дозволить проводити швидке експонування топології невеликих за розмірами ДП.

Основні вимоги до конструкції верстату для експонування топології наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Характеристики макету для досліджень

| № | Характеристики | Значення |
|---|---------------------------------------|-------------------------|
| 1 | Технологія друку | LCD |
| 2 | Область експонування топології ДП, мм | не менше 130×70 |
| 3 | Роздільна здатність, піксел | не менше 3840×2400 (4K) |

| | | |
|---|-------------------------------------|----------------------------|
| 4 | Максимальна час засвітлення шару, с | 60 |
| 5 | Довжина хвилі, нм | від 405 до 435 |
| 6 | Витратні матеріали | сухий плівковий фоторезист |

Продовження таблиці 1.5.

| | | |
|----|-------------------------------|---|
| 7 | Операційні системи | Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8, Windows 10, Linux, MacOS |
| 8 | Дисплей | Сенсорний |
| 9 | Інтерфейс підключення | USB |
| 10 | Вага, кг | не більше 4 |
| 11 | Загальні розміри принтера, мм | не більше 300×200×400 |

1.8 Висновки до першого розділу

У цьому розділі було проаналізовано технологію фотолітографії як метод нанесення топологічного рисунка на друковані плати (ДП), розглянуто класифікацію друкованих плат та основні способи їх виготовлення. Окрему увагу приділено етапу експонування — ключовій операції, що визначає точність та якість формування провідникових структур.

Проаналізовано різні методи експонування, зокрема традиційні (через фотошаблон) і прямі (лазерні, рентгенівські). Серед них лазерний метод є найбільш перспективним завдяки поєднанню високої точності, роздільної здатності та швидкодії, а також зростаючій доступності обладнання.

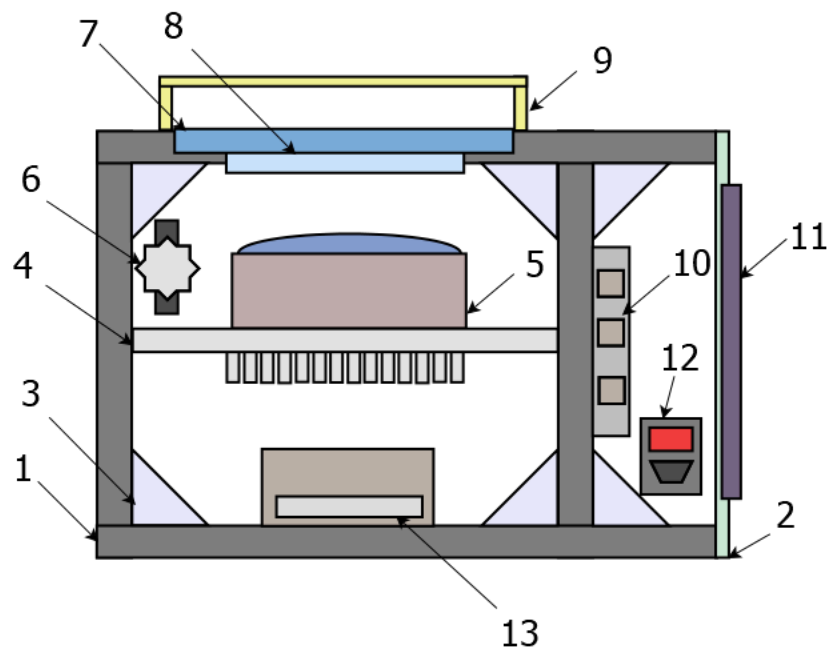
Також розглянуто сучасні адитивні технології — 3D-друк з використанням фотополімерів (SLA, DLP, LCD) — як альтернативу традиційній фотолітографії. Ці методи дозволяють об'єднати етапи нанесення маски та експонування в єдину операцію, що значно спрощує процес виготовлення ДП.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що фотополімерний 3D-друк, особливо з використанням технологій LCD, має значний потенціал для застосування в прототипуванні та малосерійному виробництві друкованих плат, забезпечуючи баланс між точністю, гнучкістю та вартістю виробництва.

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МАКЕТУ

2.1 Кінематична схема макету

Виходячи з ТЗ пропонується наступна компоновка макету для експонування топології ОДП та ДДП. Основою конструкції для виготовлення макету буде взята технологія LCD фотополімерного 3D-друку. З урахуванням специфіки цієї технології, компоновання макета подано на рисунку 2.1.



- 1 – алюмінієвий профіль; 2 – композитні пластини; 3 – кутки для профілю; 4 – радіатор лампи; 5 – УФ-лампа; 6 – охолодження екрана;
7 – плівка; 8 – LCD-екран; 9 – захисний ковпак; 10 – плата керування;
11 – сенсорний екран; 12 – кнопка живлення; 13 – блок живлення.

Рисунок 2.1 – Структурна схема макету

Каркас макета сформовано зі станочного алюмінієвого профілю 20×20 мм (1), з'єднаного за допомогою кутових з'єднувачів (3). Конструкцію макета умовно поділено на дві функціональні секції: відділення для розміщення експонувальної електроніки та відділення, призначене для

електроніки системи керування. Зовнішню обшивку макета виконано з панелей (2).

Усередині експонувального відділення розташовано основний функціональний елемент – діодну лампу (5), закріплену до каркасу за допомогою перехідних монтажних пластин. Для забезпечення ефективного тепловідведення під лампою встановлено радіатор (4).

У верхній частині конструкції, на певній відстані від лампи, розміщено LCD-екран (8), поверх якого щільно прилягає захисна плівка (7). Для зменшення перегріву та подовження строку експлуатації екрана застосовується система повітряного охолодження (6).

У робочій області верхньої частини рами передбачено встановлення захисного ковпака (9), що виконує функції захисту плівки від пилу та механічних забруднень, а також запобігає шкідливому впливу УФ-випромінювання на органи зору під час експлуатації макета.

Керування функціональними елементами макета та передача зображення для експонування здійснюється за допомогою плати керування (10), взаємодія з якою забезпечується через сенсорний екран (11).

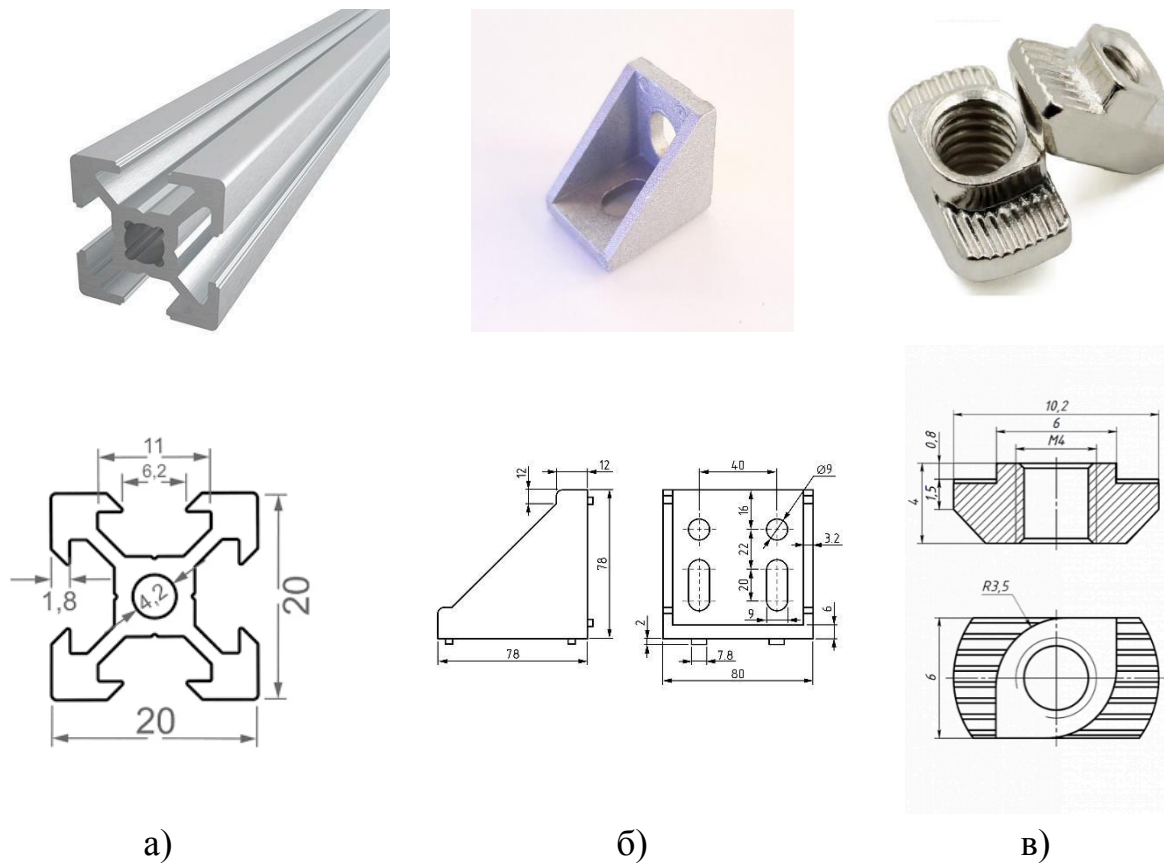
Живлення системи забезпечується блоком живлення (13) у поєднанні з кнопкою увімкнення (12).

2.2 Елементна база макету

2.2.1 Механічна складова

До механічної частини макету входять елементи корпусу, а саме:

- алюмінієвий станочники профіль профіль 20×20 мм, рис. 2.2 а;
- кутки для з'єднання профілю, рис. 2.2 б;
- Т-гайки М4, рис.2.2 в.



а) – алюмінієвий профіль 20×20; б) – кутки для профілю; в) – Т-гайка М4

Рисунок 2.2 – Елементи корпусу макету

2.2.2 Електронна складова

Електронна складова макету складається з наступних елементів: УФ-лампа; LCD-екран; плата керування; сенсорний екран; блок живлення.

Для управління пристроєм використовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 2 Model B v1.1 [13], рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Плата керування Raspberry Pi 2 Model B v1.1

Характеристик плати керування наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики Raspberry Pi 2 Model B v1.1

| № | Параметр | Значення |
|----|--------------------------|---------------------------|
| 1 | RAM | 1 Гбайт |
| 2 | Процесор | BCM2836 |
| 3 | Живлення | 5В 2А |
| 4 | Кількість ядер процесора | 4 |
| 5 | GPIO контактів | 40 pins |
| 6 | Частота процесора | 900 МГц |
| 7 | Інтерфейси | 3.5 Jack, HDMI, RJ45, USB |
| 8 | Мережеві можливості | Ethernet 10/100/1000 |
| 9 | USB порти | 4 |
| 10 | Сховище eMMC | microSD |

LCD екран також від виробника фірми Anysubic [14], має роздільну здатність дисплея, яка керується за технологією MSLA (Masked Stereolithography) Матриця підключається до плати керування за допомогою двох шлейфів та плати перехідника, рис. 2.3.

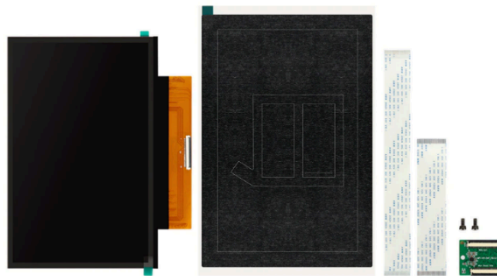
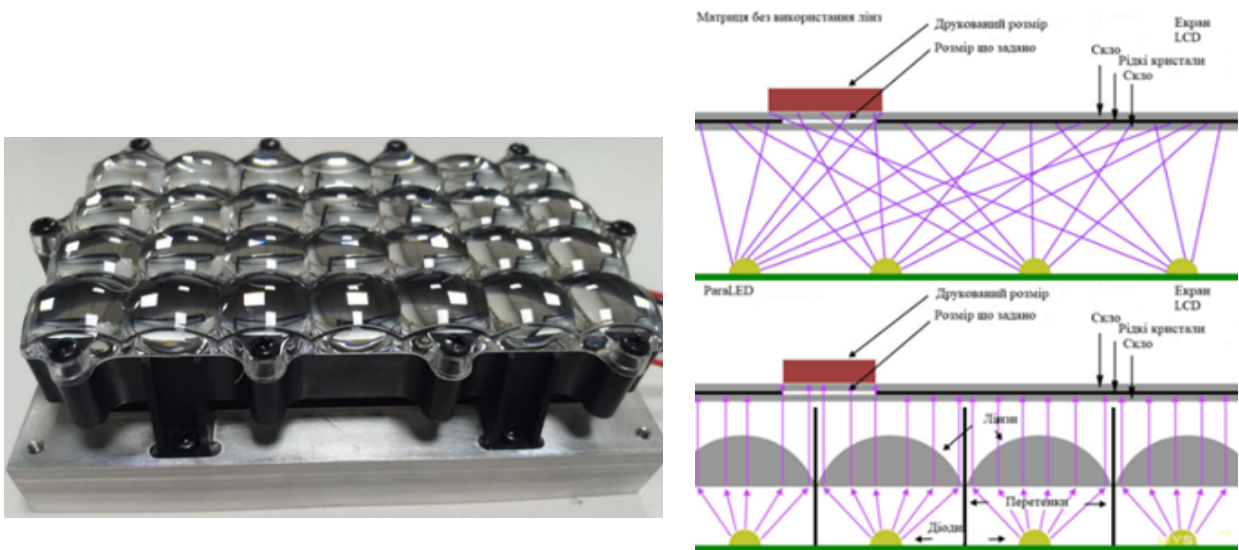


Рисунок 2.3 – LCD матриця

В якості джерела УФ-випромінювання в даній моделі використовується світлодіодна матриця з використанням кварцових лінз ParaLED [15], яка має кут розсіювання випромінювання 15° . Для використання такої матриці потрібно 50 В напруги та 1.5 А струму. Система ParaLED більш поширена за рахунок надійності в порівнянні з системами засвітлення зі світлодіодною матрицею та фокусатором. В результаті друку багатьох моделей було

визначено, що розглянута система дає менше паразитного засвітлення, рис. 2.4.



а)

б)

а – світлодіодна матриця ParaLED; б – порівняння системи ParaLED та звичайні світлодіоди з фокусатором.

Рисунок 2.4 – Світлодіодна матриця ParaLED

Взаємодія з макетом виконуються через сенсорний дисплей MKS TFT24 [16], рисунок 2.5. В таблиці 2.2 наведені характеристика сенсорного дисплея.

Таблиця 2.2 – Характеристики сенсорного дисплею MKS TFT24

| № | Параметре | Значення |
|---|---------------------------------|--|
| 1 | Розмір дисплея, мм | 87×50 |
| 2 | Colorful сенсорний екран, дюйми | 2,4 |
| 3 | Формат файлу | Gcode |
| 4 | Мікропроцесор | 32 біт STM32 |
| 5 | Масштабований модуль | WIFI / автоматичне вимкнення / визначення рівня сигналу / визначення потужності / зовнішній зовнішній зчитувач |
| 6 | Підтримка картки | SD |



Рисунок 2.5 – Сенсорний дисплей MKS TFT24

Для живлення принтеру використовуються зовнішній блок живлення 12В на 360 Вт. В таблиці 3.3 наведені характеристики блоку живлення.

Таблиця 2.3 – Характеристики блоку живлення

| № | Параметр | Значення |
|---|------------------------|-----------|
| 1 | Вхідна напруга, В | 220 AC |
| 2 | Вихідна напруга, В | 12 DC |
| 3 | Вихідна сила струму, А | 6 |
| 4 | Потужність, Вт | 360 |
| 5 | Розміри, мм | 115×60×35 |
| 6 | Вага, кг | 0,4 |

Для охолодження LCD-екрану та УФ-матриці, будуть використовуватися 24 В вентилятори 40×40 мм, рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Вентилятори для охолодження

Блок живлення був обраний BIOM DC24 100W 4.2A LED-24-100, рис 2.7



Рисунок 2.7 – Блок живлення BIOM DC24 100W

Характеристики цього блока живлення наведені в таблиці 2.4

| Характеристика | Значення |
|--------------------|-------------------|
| Потужність, Вт | 100 |
| Вихідна напруга, В | DC 24 |
| Струм на виході, А | 4,2 |
| Робоча напруга, В | АС від 180 до 264 |
| Тип охолодження | Пасивне |
| Матеріал корпусу | Металевий |
| Розміри, мм | 138×50×23 |
| Клас захисту | IP20 |

Для підключення блоку живлення до мережі буде використовуватися роз'єм живлення ІЕС320-С14, рис. 2.8.



Рисунок 2.8 – Роз'єм живлення ІЕС320-С14

2.3 Висновки до другого розділу

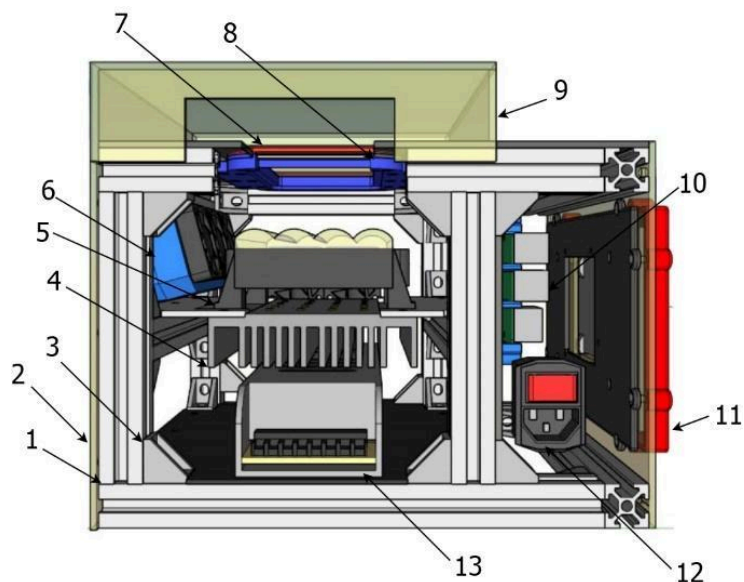
У даному розділі представлено макет, призначений для проведення експериментальних досліджень, із детальним описом його компонування, елементної бази та основних технічних характеристик. Особлива увага приділена електронній складовій, оскільки параметри LCD-матриці (зокрема, її роздільна здатність, кількість пікселів) та тип джерела ультрафіолетового випромінювання мають суттєвий вплив на відхилення геометричних розмірів топології при процесі друку.

За результатами проведеного аналізу в якості джерела випромінювання обрано світлодіодну матрицю з кварцовими лінзами типу ParaLED, яка забезпечує кут розсіювання випромінювання 15° і мінімізує паразитне засвічення. Для керування пристроєм використовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 2 Model B v1.1. До складу системи входять LCD-дисплей виробництва Anycubic, сенсорний екран MKS TFT24 для інтерактивної взаємодії з макетом, а також зовнішнє джерело живлення на 24 В із максимальною потужністю 360 Вт.

3 РОЗРОБКА 3D-МОДЕЛІ ВЕРСТАТУ ДЛЯ ЕКСПОНУВАННЯ ДП

3.1 Компоновка макету

Виходячи з розробленої кінематичної схеми та обраних елементів бази була розроблена 3D-модель верстату для експонування топології друкованих плат, рис. 3.1.



1 – алюмінієвий профіль; 2 – композитні пластини; 3 – кутки для профілю; 4 – радіатор лампи; 5 – УФ-лампа; 6 – охолодження екрана; 7 – плівка; 8 – LCD-екран; 9 – захисний ковпак; 10 – плата керування; 11 – сенсорний екран; 12 – кнопка живлення; 13 – блок живлення.

Рисунок 3.1 – Загальна схема 3D-моделі розробленого верстата

Виходячи розробленої концепції, верстат можливо умовно поділити на три функціональні вузли, а саме:

- відсік для елементів експонування топології друкованої плати;
- відсік для елементів керування верстатом;
- зона для експонування топології;
- захисний ковпак екрану.

3.1.1 Розробка рами верстату

Кожний відсік у верстаті окремий і поділений елементами рами верстату. Сама рама складається з алюмінієвого станичного профілю 20×20 мм, кутків для з'єднання профілю та Т-гайок та гвинтів М4, рис. 3.2.

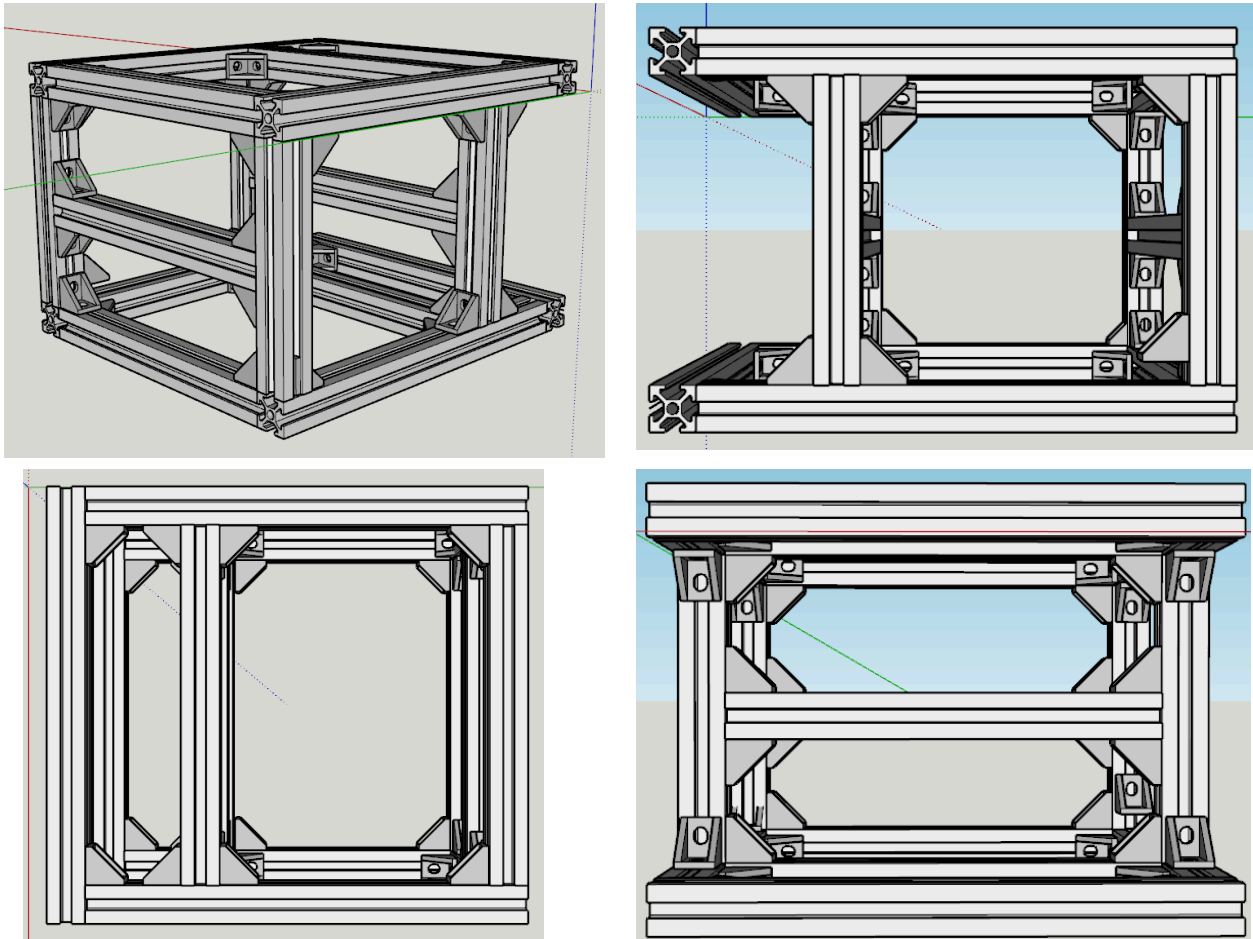


Рисунок 3.2 – Рама верстату макету

Через особливості конструкції макету, кожен відсік відгороджений, металевими листами товщиною 3 мм, до яких кріпяться електронні компоненти верстату, рис. 3.3. Нижня панель є основою до якої буде кріпитися блок живлення макету, на боковій панелі буде розташуватися плата керування та плата адаптер для LCD-матриці. В цій панелі вже зроблені пази для виведення електроніки макету. В верхній панелі зроблено віко для встановлення LCD-матриці. Також ця частина закриває відсік для електроніки від бурду та пилу.

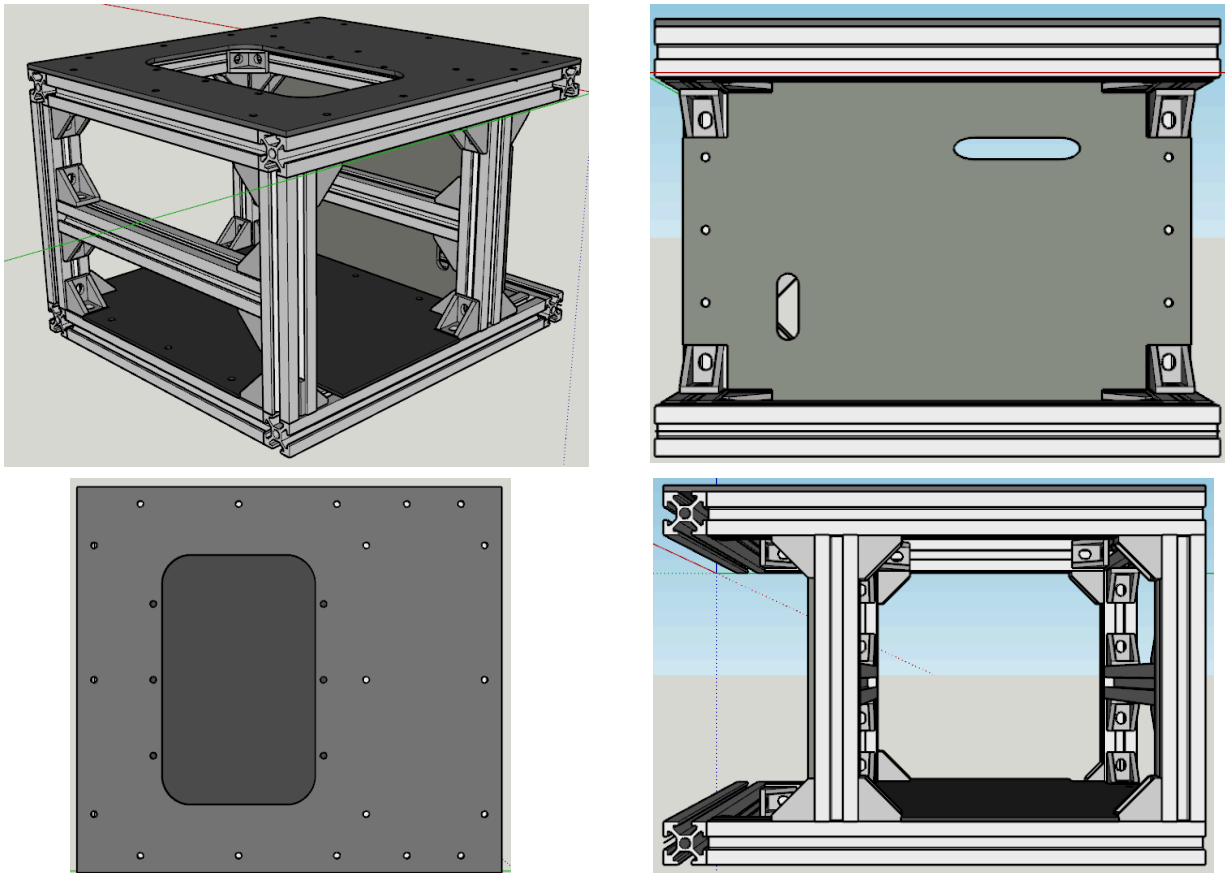


Рисунок 3.3 – Панелі для встановлення електроніки

3.1.2 Відсік для елементів експонування топології

У цій частині макету повинні розплигатися наступні елементи макету, такі як:

- радіатор лампи;
- УФ-лампа;
- охолодження екрана;
- плівка;
- LCD-екран;
- блок живлення.

Блок живлення як сама важка та габаритна частина буде знаходитися на нижній панелі верстату. На ним враховуючи особливості технології LCD-друку, буде знаходитися радіатор та УФ-лампа для експонування

зображення. Радіатор служить для відводу тепла від УФ-лампа під час експонування зображення топології. Для встановлення радіатора використовуються два алюмінієвих кронштейну, які кріпляться на центральні горизонтальні балки рами макету, рис. 3.4. На радіаторі розташовуються УФ-діоди та лінзи з системою ParaLED, для фокусування випромінювання.

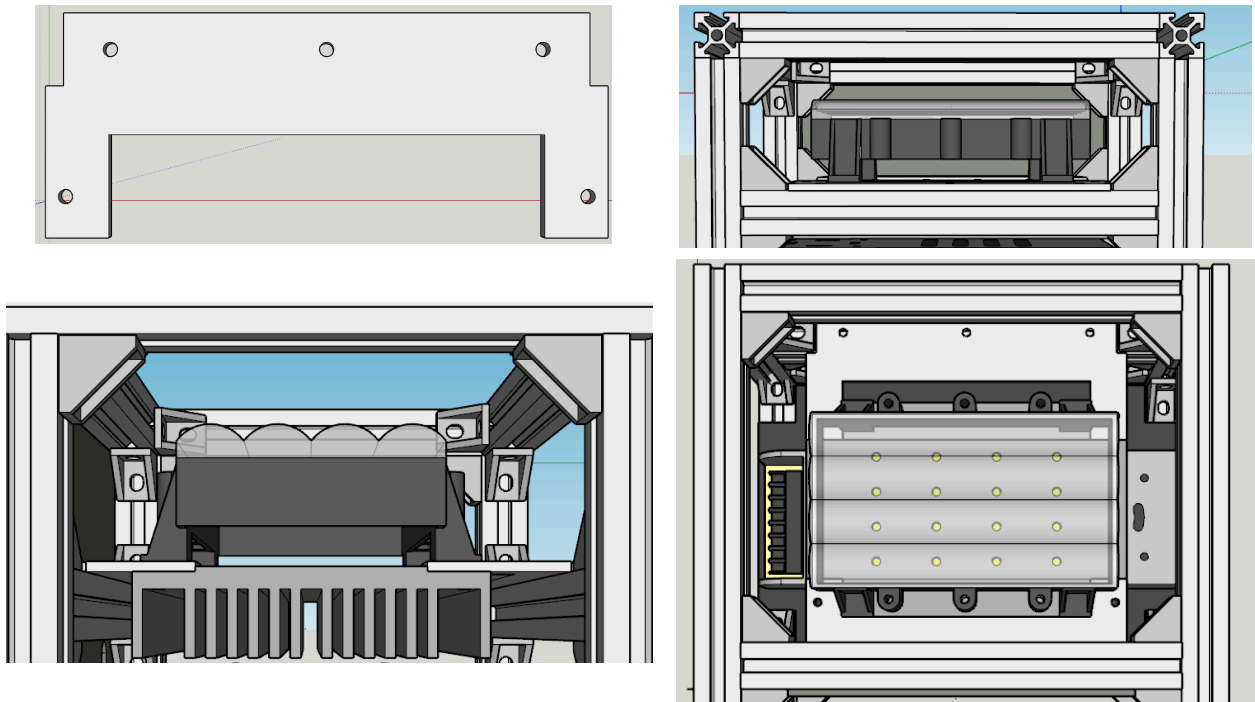


Рисунок 3.4 – Розташування радіатора та УФ-лампи

Над УФ-лампою розташовуються LCD-екран, який використовується для формування зображення топології. Встановлюється він вікно у верхній панелі. Для фіксації LCD-екрану на верхню панель використовуються надруковані рамки з пластику, верхня та нижня рамки, між якими знаходиться екран, рис. 3.5

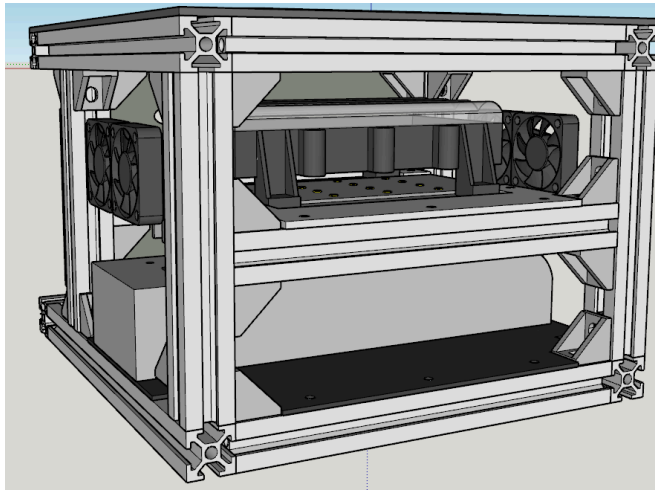
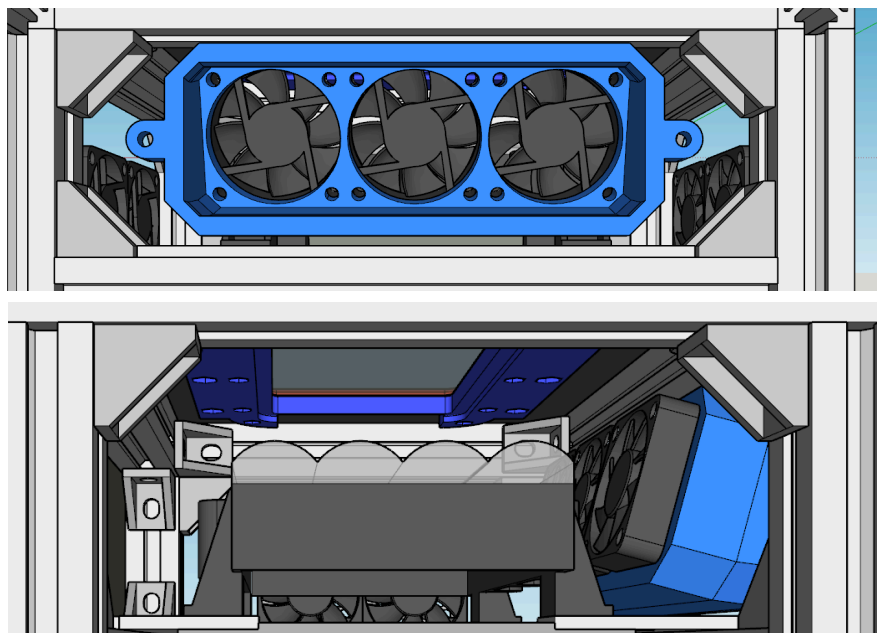


Рисунок 3.7 – Охолодження УФ-лампи

Для охолодження LCD-екрану, також передбачена система охолодження. Вона включає в себе три вентилятора 40×40 мм, які розташовані до LCD-екрану під кутом 15°, та подають холодне повітря зовні верстату в середину відсіку для елементів експонування топології, рис. 3.8. Кріпиться вентилятори за допомогою надрукованого кронштейну до передньої облицьованої панелі.



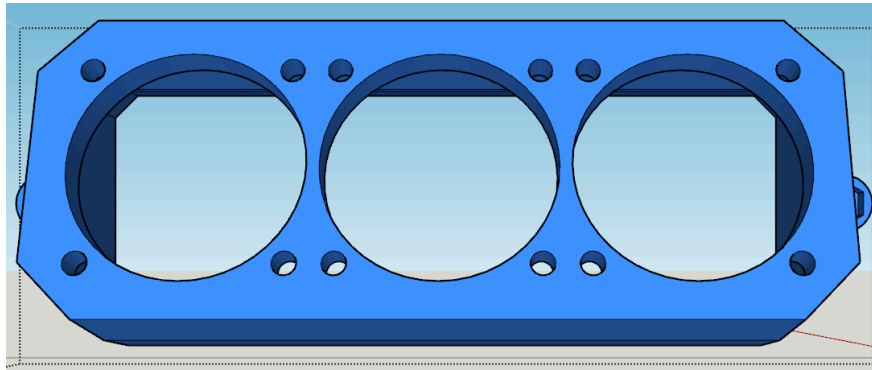
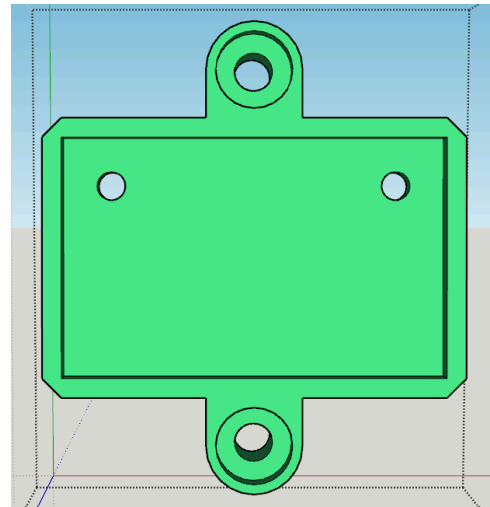
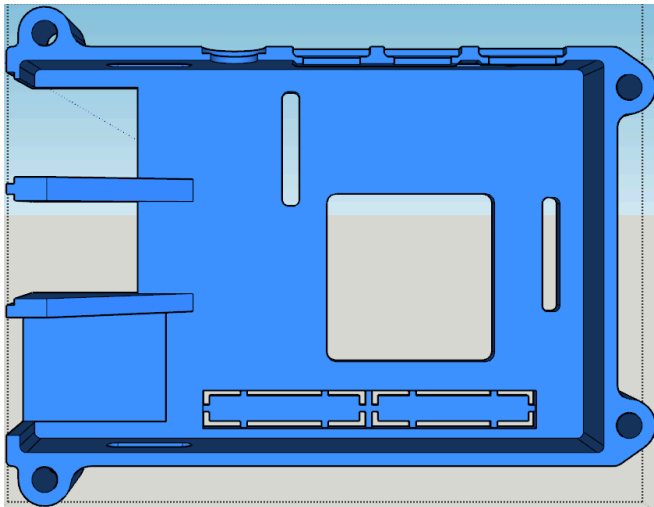


Рисунок 3.7 – Система охолодження LCD-екрану

3.1.3 Відсік для елементів керування верстатом

В відсіку для елементів керування верстатом буде розміщуватися плата керування Raspberry Pi 2 Model B v1.1 та плата для підключення шлейфу від LCD-екрану. Встановлюватися вони будуть на задній панелі для електроніки за допомогою надрукованих підставок, рис. 3.8.



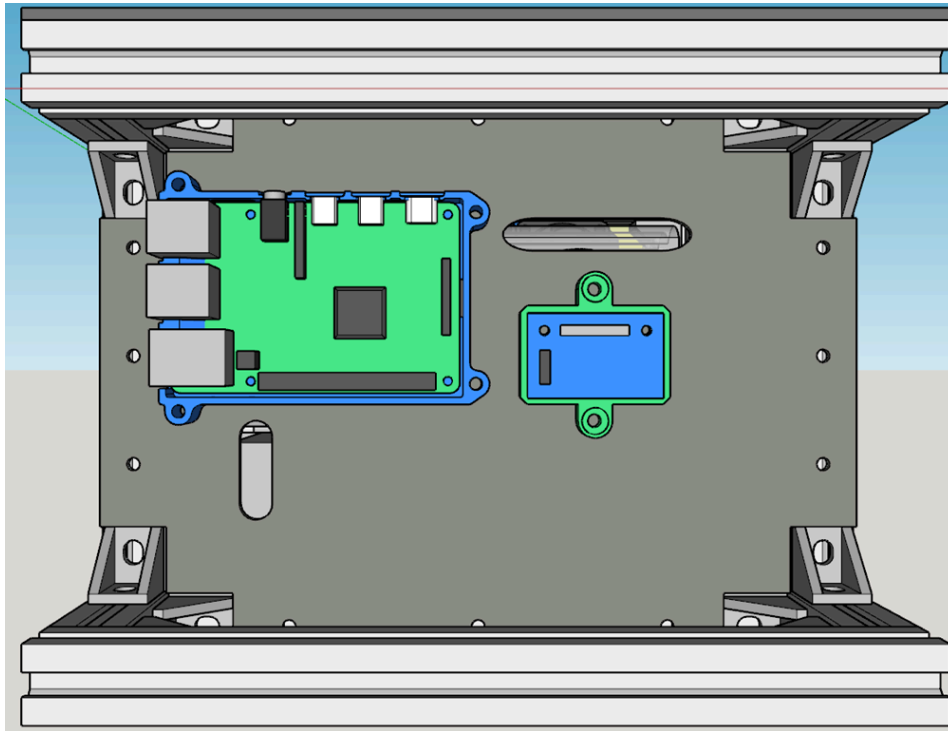
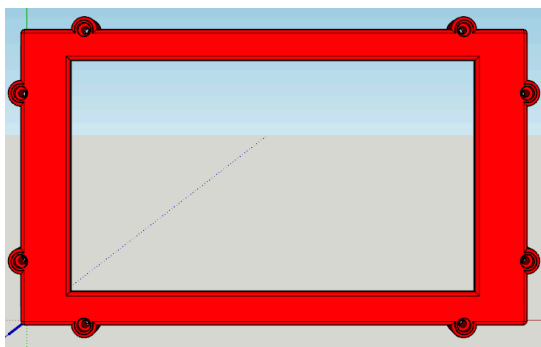
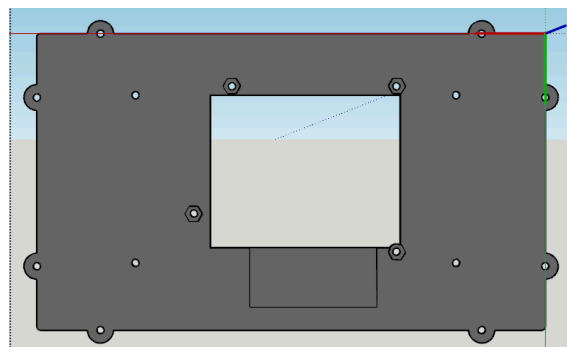


Рисунок 3.8 – Розміщення плати керування

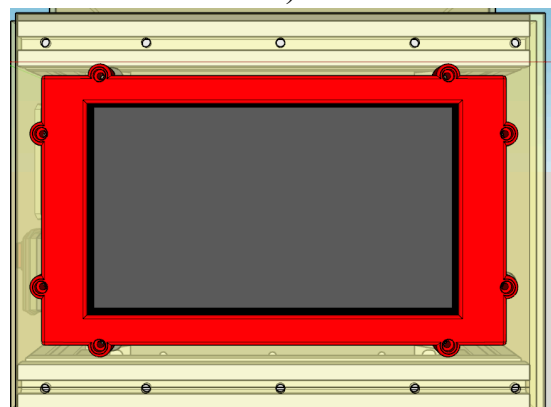
Для керування верстатом буде використовуватися сенсорний екран MKS TFT24, який буде розташовуватися на передній зовнішній панелі макету за допомогою переданої та задньої надрукованої кришки, рис. 3.9.



а)



б)



в) г)
а – верхня кришка дисплею; б – задня кришка дисплею; в – дисплей MKS
TFT24; г – розташування дисплею на передній частині верстату

Рисунок 3.9 – Встановлення дисплею MKS TFT24

Для підключення верстату до мережі використовується роз'єм живлення, встановлений на боковій панелі, рис. 3.10.

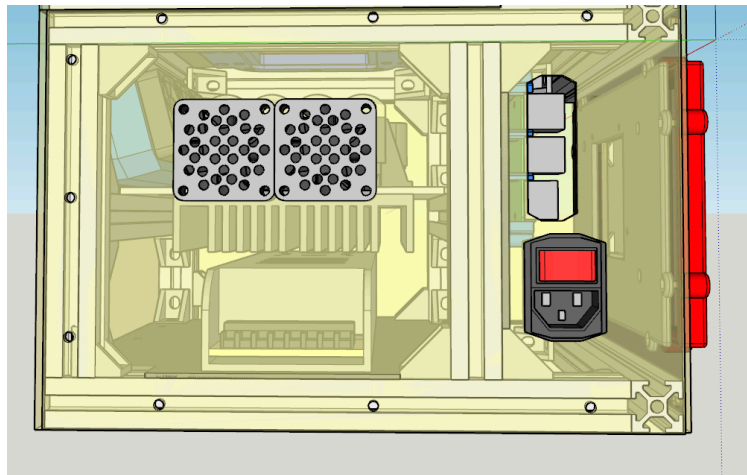


Рисунок 3.10 – Роз'єм живлення верстату

3.1.4 Зовнішні панелі макету та захисний ковпак екрану

Для захисту екрану від зовнішніх пошкоджень, використовується захисний ковпак екрану, який складеться з п'яти акрилових пластин товщиною 3 мм, скляних між собою, рис. 3.11.

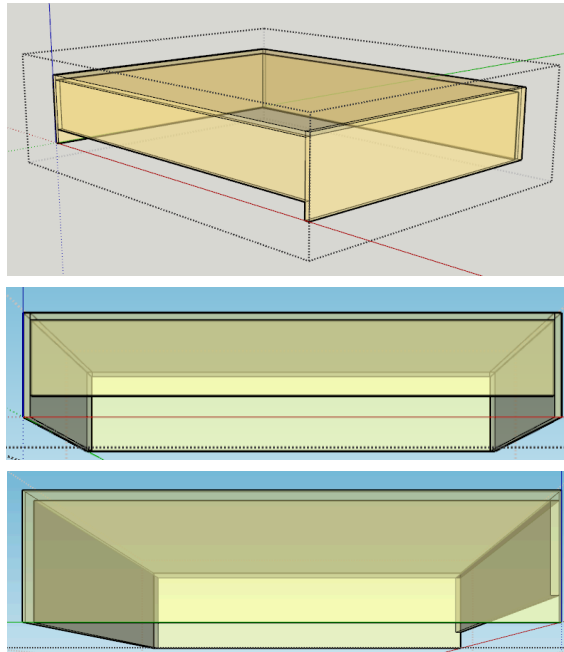
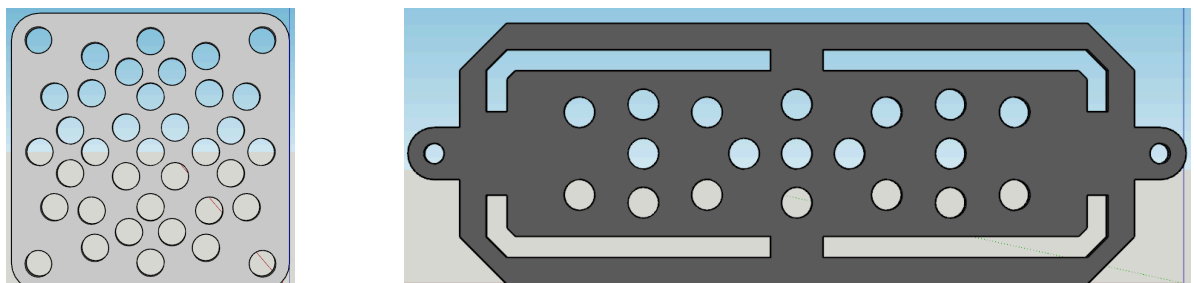


Рисунок 3.11 – Решітки для вентиляторів охолодження

Для захисту вентиляторів для охолодження LCD-екрану та УФ-лампи, від пилу та бруду будуть використовуватися надруковані решітки, чотири для вентиляторів для охолодження УФ-лампи та одна для LCD-екрану, рис. 3.12.



а)

б)

а – решітка для вентиляторів охолодження УФ-лампи; б – решітка для вентиляторів охолодження LCD-екрану

Рисунок 3.12 – Решітки для вентиляторів охолодження

Для облицювання корпусу верстату також будуть використовуватися акрилові пластини, рис. 3.13

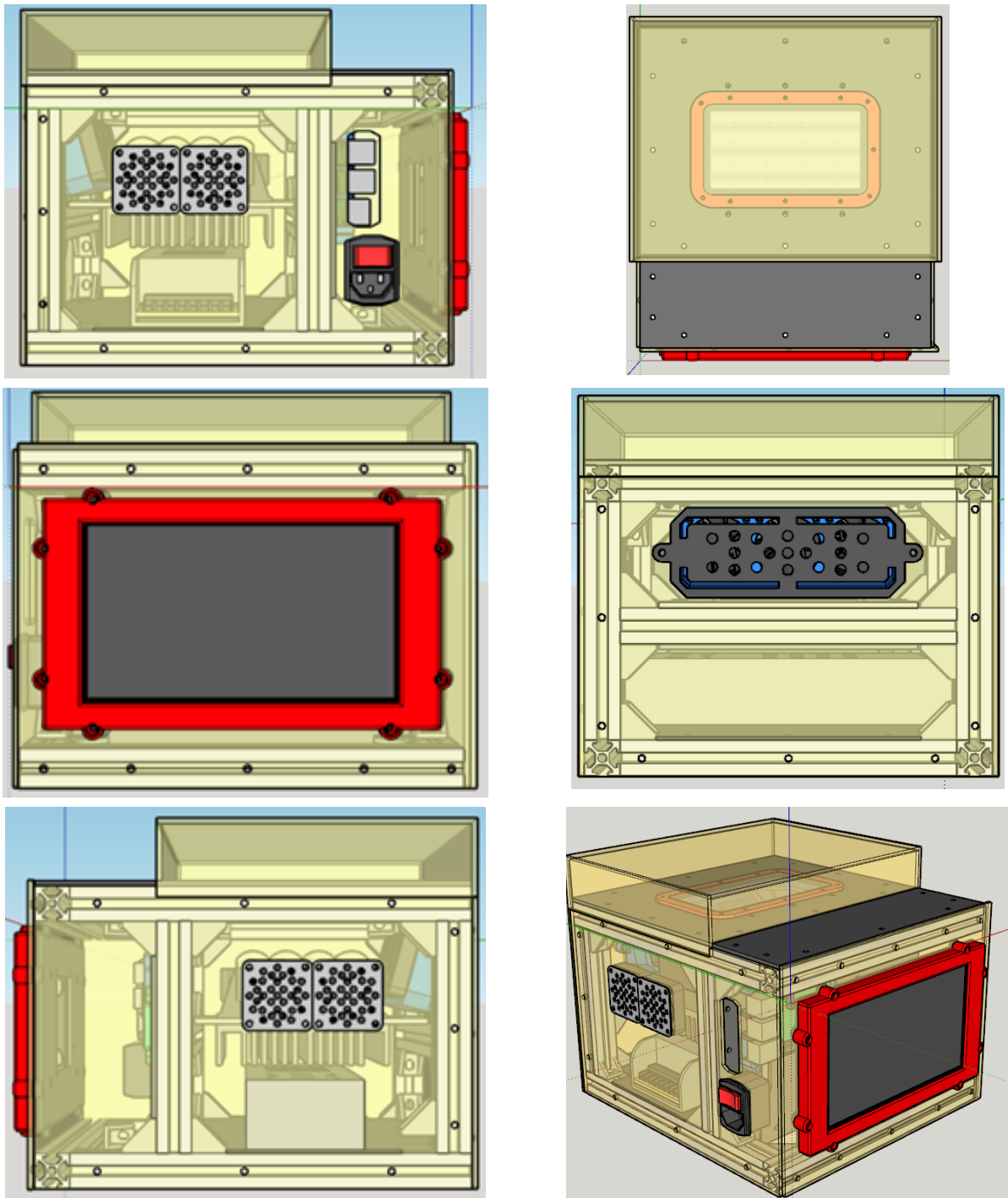


Рисунок 3.13 – 3D модель макету

3.2 Висновки до третього розділу

У даному розділі розроблено 3D-модель макету для експонування

топології друкованих плат. За результатами роботи була створена 3D-модель макету у програмному середовищі SketchUp 2020. В даній моделі розглянута компоновка електроніки макету, розроблено систему охолодження для УФ-лампи та LCD-екрану. Описано кріплення основних елементів верстату та принцип їх взаємодії.

За результатними роботи спроектовано верстат з загальними габаритами $258 \times 234 \times 212$ мм, вага макету розрахунково 5,2 кг. Енергоживлення постійний струм 24 В, потужність 360 Вт. Даний верстат може експонувати топології одношарових та двошарових плат, з максимальним розміром 130×70 мм.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Безпека при роботі з хімічними матеріалами

Виготовлення друкованих плат із застосуванням є одним з найнебезпечніших процесів з точки зору охорони праці та екології, з поміж більшості технологічних процесів електронної. Виготовлення ДП включає наступні етапи:

- попереднє експонування УФ – випромінюванням (діапазон А) фотополімерної пластини;
- основне експонування тим же УФ – випромінюванням через негатив;
- вимивання неполімерізованих ділянок, як правило, за допомогою сольвентних розчинів на основі спиртів і вуглеводнів;
- сушка гарячим повітрям;
- кінцева обробка для усунення липкості і додаткового засвічення УФ – випромінюванням для повної полімеризації друкарських елементів.

В процесі виготовлення ДП на працюючого діють наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- фізичні (несприятливі мікрокліматичні умови, УФ-випромінювання, рухомі механізми та машини, враження електричним струмом);
- хімічні (складові фотополімерних композицій, озон).

Для забезпечення захисту працюючого від небезпечної та шкідливої дії наведених вище виробничих факторів технологічне обладнання повинно відповідати основним вимогам безпеки щодо обладнання, яке використовується при виготовленні ДП:

- конструкція всіх секцій повинна виключати можливість попадання робочих розчинів у зону механізмів приводу, на зовнішню поверхню секцій і в приміщення;

- секції з використанням розчинів, що виділяють шкідливі речовини, повинні мати блокування;
- секція сушіння повинна мати блокування, що відключає лампи УФ-випромінювання при відкритій кришці;
- в секціях з використанням розчинів, що виділяють шкідливі речовини, повинен бути передбачене місцеве відсмоктування (при необхідності з примусовою вентиляцією) і пристрої для приєднання до витяжної вентиляційної системи
- частини обладнання, які постійно перебувають у полі зору працюючого персоналу, не повинні мати блискучої поверхні.

Окрім вище перелічених вимог, для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов особливо у випадках, коли має місце опромінення працюючого тепловим потоком інтенсивністю 350 Вт/м² і більше, встановлюють повітряну завісу робочих місць, або використовують загальну систему штучної вентиляції (припливної та витяжної), для зниження концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони до гранично допустимих концентрацій (ГДК), якщо місцева витяжна вентиляція не забезпечує задану чистоту повітря [22].

Однак найбільш явною і прямою загрозою здоров'ю обслуговуючого персоналу, а також екологічному стану довкілля, з боку традиційного процесу виготовлення ДП є використання фотоматеріалів і розчинників.

Альтернативним більш ефективним рішенням є використання фотополімерів, які вимиваються водопроводною водою. Пряме лазерне гравіювання друкованих плат повністю усуває необхідність використання розчинників.

Рідкі фотополімерні композиції – це наступний крок. Рідке зв'язне дозволяє легко вимити і знову використати полімер з незасвічених ділянок. До того ж відходи рідких фотополімерів не класифікуються як небезпечні та токсичні. Тим не менш, необхідна обережність у поводженні з ними, щоб домогтися відповідності нормативним документам.

4.2 Висновки до четвертого розділу

У розділі розглянуто небезпечні та шкідливі фактори при виробництві ДП, а також особливості застосування хімічних речовин на різних етапах їх виготовлення при різних технологіях. Наведені правила організації виробничого процесу, які забезпечують захист працівників від шкоди. Як один із способів зменшення шкідливого впливу хімічних речовин на працівників зазначено використання сучасних технологій з використанням фотополімерів, в яких не потребуються агресивні рідини та речовини.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі було проведено комплексний аналіз технології фотолітографії як основного методу нанесення топологічних рисунків на друковані плати. Розглянуто класифікацію друкованих плат та основні способи їх виготовлення, зокрема приділено особливу увагу етапу експонування — ключовій операції, що визначає точність і якість формування провідникових структур. Проаналізовано традиційні та сучасні методи експонування, серед яких лазерний метод вирізняється високою точністю, роздільною здатністю і швидкодією. Окремо досліджено потенціал адитивних технологій 3D-друку з використанням фотополімерів (SLA, DLP, LCD) як перспективної альтернативи, що дозволяє спростити процес виготовлення ДП, поєднуючи етапи нанесення маски та експонування.

Розроблено макет пристрою для проведення експериментальних досліджень, в якому детально описано компонування, елементну базу та основні технічні характеристики. Визначено, що параметри LCD-матриці і тип джерела УФ-випромінювання істотно впливають на геометричну точність друку. В якості джерела обрано світлодіодну матрицю з кварцовими лінзами ParaLED, що забезпечує оптимальний кут розсіювання та мінімізацію паразитного засвічення. Для керування макетом застосовано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, а також інтерактивний сенсорний екран MKS TFT24.

На основі проведених досліджень розроблено 3D-модель верстата у програмному середовищі SketchUp 2020. Проект включає компоновку електронних компонентів, систему охолодження для УФ-лампи та LCD-екрану, а також кріплення основних елементів із продуманою взаємодією. Верстат має компактні розміри (258×234×212 мм), вагу 5,2 кг, працює від джерела живлення 24 В і потужністю 360 Вт. Він здатен експонувати топології одно- та двошарових друкованих плат розміром до 130×70 мм.

Таким чином, виконана робота підтверджує перспективність застосування технології LCD 3D-друку у виробництві друкованих плат, особливо для

прототипування та малосерійного виробництва, забезпечуючи оптимальний баланс між точністю, гнучкістю і вартістю. Розроблений макет є функціональним інструментом для подальших експериментальних досліджень та удосконалення технології.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Технічні засоби автоматизації: підручник / І.Ш. Невлюдов, та ін. Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.
2. Nevliudov I., Borshchov V., Tymchuk I., Protsenko M., Demska N. Novitni konstruktyvno-tekhnologichni rishennia nadlehkykh detektornykh moduliv dlia fizychnykh eksperymentiv. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 5 (3). S. 67-78
3. Невлюдов І., Близнюк Д., Гурін Д., Нікітін Д., Разумов-Фризюк Є., Стрілець Р. Виготовлення друкованих плат за допомогою технологій 3d друку. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кораблебудування. 2020. №4. С. 79-86.
4. Невлюдов І., Разумов-Фризюк Є., Нікітін Д.. Аналіз технології лазерного експонування друкованих плат. Технологія приладобудування. 2020. №1. С.56-59.
5. Манжілевський О.Д., Іскович-Лотоцький Р.Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навч. Посіб. Вінниця : ВНТУ, 2021. 105 с.
6. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. Київ. Держстандарт України, 2017. 29 с.
7. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.

8. Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А., Нікітін Д.О., Близнюк Д.С., Стрілець Р.Е. Створення топології друкованих плат за допомогою фотополімерних адитивних технологій 3D друку. Проблеми тертя та зношування. 2021. 1 (90) С.42-54.

9. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу [Електронний ресурс] : підручник / Л.А. Яцюк та ін. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 330 с.

10. Технології фотополімерного 3D-друку: опис, переваги та недоліки. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/blog-novini-3d-druku-ta-additivnih-tehnologij/sla-dl-p-lcd-tehnologiji-fotopolimernogo-3d-druku-opis-perevagi-ta-nedoliki> (дата звернення: 15.11.2023).

11. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board. Technology Audit and Production Reserves. 2022. № 2/2(64). P.43-49. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256538.

12. Nevliudov I., Bliznyuk D., Gurin D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Technology of laser exposure of topology of printed boards. International independent scientific journal. 2021. №27. VOL. 1. P. 27.

13. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 2 Model B v1.1 URL: <https://evo.net.ua/raspberry-pi-2-model-b-v1.2/> (дата звернення 10.12.23)

14. LCD матриця для 3D принтера Anycubic URL: <https://ua.anycubic.biz/lcd-screens> (дата звернення 10.12.23)

15. Світлодіодна матриця ParaLED URL: <https://pro3d.com.ua/p1006075888-svitlodiodna-matritysa-dlya.html> (дата звернення 10.12.23)

16. Сенсорний дисплей MKS TFT24/TFT35. URL: <https://www.3dprinter.ua/shop/sensornyj-dysplej-mks-tft24-tft35/> (дата звернення 10.12.23)

17. Nevlyudov I., Razumov-Fryziuk I., Nikitin D., Blyzniuk D., Strelets R. Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks. Сучасний стан наукових досліджень і технологій у промисловості. 2021. № 1 (15). С. 120-131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>

18. Нікітін Д. О. Вплив фотополімерних смол на збереження геометричних розмірів 3D-моделей. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: тезидоп. Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Черкаси, 13-19 березня 2023 р.). Черкаси, 2023. С 43.

19. Nevlyudov I., Razumov-Frizyuk E., Nikitin D., Badaniuk I., Strelets R. Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. *Information systems in project and program management*. Collective monograph edited by I. Linde European University Press. Riga: ISMA, 2023. 317 p.

20. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Е.А. Regression analysis of the influence of technological parameters of 3D printing on product quality. «Theoretical and scientific bases of development of scientific thought»: тези доп. V Міжнар. наук. конф. з нових тенденцій у науці та освіті (Рим, Італія, 16 – 19 лют. 2021 р.), С. 60 66.

21. Гогіташвілі Г.Г., Лапін В. М. Основи охорони праці : навч. посіб. Львів : Новий світ-2000, 2008. 232 с.